

Empirische physikalische Eigenschaften des übersättigten innerstädtischen Verkehrs und Energieeffizienz von Fahrzeugen

Dissertation

**vorgelegt bei der
Fakultät für Physik der Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften**

von

Peter Hemmerle

aus Oberhausen

2016

Datum der Disputation: 27. Juni 2016

1. Gutachter: Prof. Dr. Michael Schreckenberg
2. Gutachter: Prof. Dr. Andreas Schadschneider

Danksagungen

Zuerst bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Michael Schreckenberg Betreuung der Arbeit die Ermöglichung einer externen Promotion.

Herrn Prof. Dr. Andreas Schadschneider danke ich für die bereitwillige Übernahme der Aufgabe des zweiten Gutachters.

Ich bedanke mich bei Herrn Dr. Hubert Rehborn und Herrn Prof. Dr. Boris Kerner, die mich bei der Arbeit fachlich und menschlich begleitet haben.

Für die Bereitstellung anonymisierter GPS-Daten von Navigationsgeräten bedanke ich mich bei Herrn Dr. Nikolaus Witte, Herrn Dr. Stefan Lorkowski und Herrn Oliver Kannenberg. Für Detektordaten vom innerstädtischen Straßennetz danke ich Herrn Nicolas Gath, Herrn Dr. Timo Finke und Herrn Heiko Böhme. Weiterhin danke ich Herrn Dr. Frank Offermann, Herrn Tobias Schendzielorz und Herrn David Rohatschek, die mir Feldversuchsdaten und eine empirische mikroskopische Energiematrix für ein Elektrofahrzeug zur Verfügung stellten. Für die Bereitstellung einer empirischen mikroskopischen Verbrauchsmatrix für Verbrennerfahrzeuge bedanke ich mich bei Herrn Dr. Micha Koller. Zudem danke ich ihm für zahlreiche Diskussionen und seine Hilfsbereitschaft bei Computerfragen. Herrn Gerhard Hermanns danke ich für Simulationsdaten, zahlreiche Diskussionen und die gute Zusammenarbeit.

Für ihre Unterstützung in den vergangenen Jahren danke ich meinen Eltern Brigitte und Dieter und meinem Bruder Thomas.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird der übersättigte innerstädtische Verkehr im Hinblick auf seine empirischen physikalischen Eigenschaften analysiert und der Zusammenhang zwischen übersättigtem innerstädtischem Verkehr und der Energieeffizienz von Fahrzeugen untersucht.

Der empirischen Untersuchung des übersättigten innerstädtischen Verkehrs liegen anonymisierte Einzelfahrzeugdaten von Navigationsgeräten zugrunde. Dabei handelt es sich um zeitabhängige GPS-Positionen zufällig im Verkehrsfluss verteilter Einzelfahrzeuge, aus denen Fahrzeugtrajektorien und die zeitlichen Geschwindigkeitsverläufe entlang dieser Fahrzeugtrajektorien rekonstruiert werden können. Zusätzlich zu den anonymisierten GPS-Einzelfahrzeugdaten werden aggregierte Daten der mittleren Geschwindigkeit und des Verkehrsflusses herangezogen, die von stationären Detektoren gemessen wurden. Die empirische Untersuchung beruht auf Daten von drei verschiedenen Streckenabschnitten des Verkehrsnetzes der Stadt Düsseldorf aus den Jahren 2011, 2013 und 2014.

Die empirische Untersuchung zeigt, dass empirischer übersättigter Verkehr nach Einbruch der Geschwindigkeit aus klassischen Folgen von Moving Queues, Strukturen des Synchronisierten Verkehrs und Mischungen aus Moving Queues und Synchronisiertem Verkehr besteht. Diese Verkehrsmuster des übersättigten Verkehrs wechseln sich nach Einbruch der Geschwindigkeit typischerweise in Zeit und Raum ab. Werden zusätzlich zur eingebrochenen Geschwindigkeit infolge einer starken Engstelle auch niedrige Verkehrsflüsse gemessen, so lässt sich eine empirische Mega-Queue beobachten.

Ein weiteres Ergebnis dieser Arbeit ist, dass die Energieeffizienz von Fahrzeugen im übersättigten Verkehr verbessert werden kann, wenn der übersättigte Verkehr nur aus Synchronisiertem Verkehr besteht und nicht aus Folgen von Moving Queues. Dieser Zusammenhang wird anhand der Kumulierten Beschleunigung, einer Summe positiver Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen aufeinanderfolgenden Messungen entlang einer Trajektorie, untersucht. Es wird gezeigt, dass die Kumulierte Beschleunigung für empirische Folgen von Moving Queues deutlich größer ist als für empirische Strukturen des Synchronisierten Verkehrs. Der Energieverbrauch von Fahrzeugen steigt wiederum mit wachsender Kumulierter Beschleunigung. Letztere Abhängigkeit wird anhand empirischer mikroskopischer Energiematrizen und Fahrzeugtrajektorien aus Verkehrsflusssimulationen ermittelt.

Als praktisch anwendbares Ergebnis werden makroskopische Energiematrizen für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor und Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb gezeigt. Diese makroskopischen Matrizen können bei der Online-Berechnung energieeffizienter Routen in städtischen Straßennetzen verwendet werden.

Abstract

In this thesis, oversaturated traffic in urban roads is analyzed with regard to its empirical physical properties. Furthermore, the connection between oversaturated urban traffic and the energy efficiency of vehicles is studied.

The empirical analysis of oversaturated urban traffic is based on anonymized single-vehicle data from navigation devices. From these time-dependent GPS positions of vehicles which are randomly distributed in traffic flow vehicle trajectories can be reconstructed. In addition to the anonymized single-vehicle GPS data, aggregated data of mean speed and traffic flow measured by stationary detectors are used. The empirical analysis is based on data from three different road sections of the traffic network of the city of Düsseldorf, Germany, measured in 2011, 2013, and 2014.

The empirical analysis shows that empirical oversaturated traffic after speed breakdown consists of classical sequences of moving queues, synchronized flow patterns and mixtures between moving queues and synchronized flow. Typically, these traffic patterns of oversaturated city traffic alternate in space and time after speed breakdown. If, in addition to speed breakdown, low traffic flow values are measured due to a heavy bottleneck, an empirical mega-queue is observed.

A further result of this thesis is that the energy efficiency of vehicles in oversaturated traffic can be improved if oversaturated traffic consists only of synchronized flow rather than consisting of sequences of moving queues. This connection between traffic patterns and the energy efficiency of vehicles is analyzed by means of the cumulated vehicle acceleration, a sum of positive speed differences between subsequent measurements. It is shown that the cumulated acceleration is considerably greater for empirical sequences of moving queues than for empirical synchronized flow patterns. The energy consumption of vehicles in return increases with increasing cumulated acceleration. This latter dependency is investigated by means of empirical microscopic energy matrices and vehicle trajectories from traffic flow simulations.

As a practical result, macroscopic energy matrices for both vehicles with a combustion engine and electrical vehicles are presented. These macroscopic matrices can be used for the on-line calculation of energy efficient routes in urban traffic networks.

Inhaltsverzeichnis

Danksagungen	iii
Kurzfassung	v
Abstract	vii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Ziel	1
1.2 Aufbau der Arbeit	1
2 Grundlagen der Verkehrsflusstheorie	5
2.1 Die drei Verkehrsphasen	6
2.1.1 Freier und gestauter Verkehr	6
2.1.2 Definitionen der Phasen des gestauten Verkehrs	7
2.1.3 Charakteristische Eigenschaften von Wide Moving Jams	9
2.1.4 Hypothetische homogene Zustände des Synchronisierten Verkehrs	10
2.1.5 Wachstum und Auflösung von Wide Moving Jams im Synchronisierten Verkehr	11
2.1.6 Fahrzeugfolgeverhalten und Geschwindigkeitsanpassung	13
2.1.7 Verkehrszusammenbruch und Phasenübergänge	15
2.1.8 Starke Engstellen und Mega-Jams	17
2.2 Übersättigter innerstädtischer Verkehr an Lichtsignalanlagen	18
2.2.1 Untersättigter und übersättigter Verkehr	18
2.2.2 Moving Queues im übersättigten Verkehr	22
2.2.3 Synchronisierter Verkehr im übersättigten Verkehr	23
3 Empirische Datengrundlage und empirische makroskopische Eigenschaften des übersättigten innerstädtischen Verkehrs	27
3.1 Infrastruktur der untersuchten Streckenabschnitte	28
3.2 Makroskopische Datenerfassung basierend auf stationären Detektoren	30
3.3 Empirische innerstädtische Verkehrszusammenbrüche: Übergänge vom untersättigten zum übersättigten Verkehr	31
3.3.1 Einbruch der Geschwindigkeit	32
3.3.2 Einbruch von Geschwindigkeit und Verkehrsfluss	43
3.4 Mikroskopische Datenerfassung basierend auf Navigationsgeräten in Probe Vehicles	44

4	Empirische mikroskopische Eigenschaften des übersättigten innerstädtischen Verkehrs	49
4.1	Empirische mikroskopische Phänomene nach Einbruch der Geschwindigkeit	50
4.1.1	Klassische Moving Queues	50
4.1.2	Strukturen des Synchronisierten Verkehrs	53
4.1.3	Physikalische Eigenschaften von Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs	64
4.1.4	Kombinationen von Moving Queues und Synchronisiertem Verkehr	67
4.2	Empirische Mega-Queue	83
4.3	Zusammenfassung und Diskussion	89
5	Energieeffizienz von Fahrzeugen im übersättigten innerstädtischen Verkehr	93
5.1	Grundlagen	94
5.1.1	Empirische mikroskopische Verbrauchsmatrix	94
5.1.2	Kumulierte Beschleunigung	98
5.2	Abhängigkeit der Kumulierten Fahrzeugbeschleunigung von der Zeitintervalldauer Δt zwischen GPS-Messungen	103
5.3	Kumulierte Beschleunigung im empirischen Synchronisierten Verkehr	109
5.4	Energieeffizienz von Fahrzeugen in Abhängigkeit der Kumulierten Beschleunigung	111
5.5	Zusammenfassung	114
6	Online-Berechnung der streckenabhängigen Energieeffizienz in innerstädtischen Straßennetzen	115
6.1	Grundlagen zur streckenabhängigen Energieeffizienz	115
6.2	Makroskopische Energiematrizen	116
6.2.1	Makroskopische Verbrauchsmatrix für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor	116
6.2.2	Makroskopische Energiematrizen für Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb	118
6.3	Nutzung im Streckennetz	122
6.3.1	Vergleich der schnellsten mit der energieeffizientesten Route	122
6.3.2	Vergleich der energieeffizientesten Route für Verbrenner- und Elektrofahrzeuge	124
6.4	Schlussfolgerungen	125
7	Zusammenfassung und Ausblick	127
7.1	Ergebnisse der Arbeit	127
7.2	Ausblick	128
	Literatur	131

1 Einleitung

1.1 Motivation und Ziel

Der Straßenverkehr ist seit einigen Jahrzehnten ein Gebiet interdisziplinärer und physikalischer Forschung, das auch für praktische Anwendungen von großer Bedeutung ist.

Für die empirische Untersuchung des Straßenverkehrs bedeutete das Aufkommen anonymisierter GPS-Daten von mobilen Navigationsgeräten in Fahrzeugen einen Durchbruch: Stammten reale Verkehrsdaten früher überwiegend von Messungen stationärer Detektoren und waren Floating-Car-Daten nur vereinzelt aus zeitlich und örtlich begrenzten Feldversuchen verfügbar, so sind die Daten aus Navigationsgeräten heute praktisch für die vollständigen Straßennetze vieler Industriestaaten für jeden beliebigen Tag seit Beginn dieser Datenerhebungen verfügbar.

Nicht nur der Verkehr auf Schnellstraßen, sondern auch der innerstädtische Verkehr bietet Herausforderungen in Bezug auf sein Verständnis und dessen praktische Anwendung: Eine interessante Frage bezüglich des Verständnisses ist, wie sich die Erkenntnisse über zeitlich-räumliche Verkehrsmuster von Schnellstraßen auf innerstädtische Straßen mit Lichtsignalanlagen übertragen lassen. Eine praktische Aufgabe besteht darin, den Verkehr in urbanen Ballungsräumen auch dann möglichst ressourcenschonend zu organisieren, wenn infolge des hohen Verkehrsaufkommens Verkehrsstörungen unvermeidlich sind.

Die vorliegende Arbeit verbindet eine empirische Untersuchung mit einer praktischen Fragestellung. Ziel der Arbeit ist, die empirischen Verkehrsmuster und physikalischen Eigenschaften des übersättigten innerstädtischen Verkehrs aufzuzeigen und ihre Auswirkung auf die Energieeffizienz von Fahrzeugen zu untersuchen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Im Anschluss an diese Einleitung werden in Kapitel 2 die Begriffe und Zusammenhänge der Verkehrsflusstheorie zusammengefasst und erläutert, die den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit zugrunde liegen. Ausgangspunkt ist hierbei die Kerner'sche Drei-Phasen-Verkehrstheorie, und der Schwerpunkt liegt auf der Entstehung von Synchronisiertem Verkehr. Nach der Darlegung allgemeiner Grundlagen der Verkehrsflusstheorie wird speziell der innerstädtische Verkehr behandelt. Hierbei werden zuerst Definitionen für die Begriffe *untersättigter Verkehr* und *übersättigter Verkehr* gegeben, die zur groben Klassifizierung innerstädtischen Verkehrs verwendet werden. Anschließend wird die Betrachtung

1 Einleitung

auf den übersättigten Verkehr eingegrenzt: Die Entstehung Synchronisierten Verkehrs im übersättigten innerstädtischen Verkehr gemäß der Drei-Phasen-Verkehrstheorie wird diskutiert.

In Kapitel 3 wird die Verkehrsdatengrundlage beschrieben, auf die sich die empirischen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit stützen. Die betrachteten innerstädtischen Straßenabschnitte werden vorgestellt, und die Messtechnik erläutert: Die Erfassung ortsbezogener Verkehrsdaten mit stationären Videodetektoren wird ebenso behandelt wie die Messung und Übertragung von anonymisierten GPS-Daten durch Navigationssysteme. Außerdem enthält dieses Kapitel eine Diskussion der beiden typischen Arten innerstädtischer Verkehrszusammenbrüche auf der Grundlage empirischer Daten stationärer Detektoren: Der Einbruch der Geschwindigkeit wird ausführlich anhand einiger Beispiele aller untersuchten Streckenabschnitte behandelt. Ihm wird in einer kurzen Diskussion der Einbruch von Geschwindigkeit und Verkehrsfluss gegenübergestellt.

Gegenstand von Kapitel 4 ist die Untersuchung der empirischen mikroskopischen Eigenschaften des übersättigten Verkehrs nach Verkehrszusammenbrüchen. Die Betrachtung der zeitlich-räumlichen mikroskopischen Eigenschaften erfolgt auf der Grundlage von anonymisierten GPS-Daten. Zur Ergänzung werden auch Daten stationärer Detektoren herangezogen. Ein Großteil dieser empirischen Analyse bezieht sich auf den übersättigten Verkehr nach Einbruch der Geschwindigkeit. Zunächst werden die typischen grundlegenden zeitlich-räumlichen Verkehrsmuster vorgestellt und auf physikalische Eigenschaften hin analysiert. Anschließend werden Mischformen dieser grundlegenden Verkehrsmuster gezeigt und das zeitlich-räumliche Verhalten des übersättigten Verkehrs nach Einbruch der Geschwindigkeit diskutiert. Zusätzlich zu dieser Untersuchung des übersättigten Verkehrs nach Einbruch der Geschwindigkeit wird kurz der übersättigte Verkehr diskutiert, der sich bei eingebrochenen Geschwindigkeiten und Verkehrsflüssen beobachten lässt.

Kapitel 5 behandelt den Zusammenhang zwischen Verkehrsmustern und der Energieeffizienz von Fahrzeugen. Die mittlere Energieeffizienz wird in Abhängigkeit der *Kumulierten Beschleunigung* angegeben. Diese von Kerner eingeführte Kenngröße kann anhand anonymisierter GPS-Daten aus Navigationsgeräten berechnet werden. Die Kumulierte Fahrzeugbeschleunigung pro Streckenlänge wird in Kapitel 5 ausführlich diskutiert, und ihre Abhängigkeit von der zeitlichen Auflösung von GPS-Daten wird untersucht. Der Zusammenhang zwischen der Kumulierten Beschleunigung und den in Kapitel 4 diskutierten empirischen Verkehrsmustern des übersättigten Verkehrs wird angegeben. Dann wird die Abhängigkeit des Energieverbrauchs von Fahrzeugen von der Kumulierten Beschleunigung untersucht. Zur Bestimmung der Abhängigkeit der Energieeffizienz von der Kumulierten Beschleunigung werden sogenannte *empirische mikroskopische Verbrauchs- bzw. Energiematrizen* mit Fahrzeugtrajektorien aus Verkehrsflusssimulationen kombiniert.

In Kapitel 6 wird die Nutzung der Arbeitsergebnisse für die energieeffiziente Navigation in innerstädtischen Straßennetzen aufgezeigt. Hierfür werden *makroskopische Energiematrizen* für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren und mit elektrischem Antrieb, getrennt nach Antriebsart, aufgestellt: Für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren wird der mittlere

Verbrauch in Abhängigkeit von mittlerer Geschwindigkeit und Kumulierter Beschleunigung ausgedrückt. Für elektrisch angetriebene Fahrzeuge wird dieser Ansatz um die *Kumulierte Verzögerung* erweitert. Mit dieser dritten Kenngröße wird die Rekuperation elektrischer Energie berücksichtigt.

Die vorliegende Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick in Kapitel 7.

2 Grundlagen der Verkehrsflusstheorie

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Verkehrsflusstheorie zusammengefasst, die zur Beschreibung und Klassifizierung der empirischen Phänomene des übersättigten innerstädtischen Verkehrs in den Kapiteln 3 und 4 benötigt werden. Dabei handelt es sich sowohl um allgemeine Grundlagen der Verkehrstheorie als auch um Begriffe, die sich speziell auf den innerstädtischen Verkehr an Lichtsignalanlagen beziehen.

Bei der Erläuterung der allgemeinen verkehrsflusstheoretischen Grundlagen wird auf die Kerner'sche Drei-Phasen-Verkehrstheorie zurückgegriffen [1–16]. Dabei wird der Darstellung in den Büchern [17] und [18] gefolgt. So werden im ersten Teil dieses Kapitels die drei Verkehrsphasen, wie sie für den Verkehr auf Schnellstraßen definiert sind, erläutert, und die Übergänge zwischen diesen Phasen kurz diskutiert. Der zweite Teil des Kapitels ist dann dem übersättigten Verkehr an Lichtsignalanlagen gewidmet. Zunächst werden die Begriffe *untersättigter Verkehr* und *übersättigter Verkehr*, welche die Hauptzustände des Verkehrs an Lichtsignalanlagen bezeichnen, erklärt. Anschließend werden die Verkehrsmuster des übersättigten Verkehrs, *Moving Queues* und *Synchronisierter Verkehr* erklärt, die den Verkehrsphasen *Wide Moving Jam* und *Synchronisierter Verkehr* der Drei-Phasen-Verkehrstheorie für Schnellstraßen entsprechen.

Da in Kapitel 3 noch auf Messtechnik eingegangen wird, werden im Folgenden nur kurz die Messgrößen eingeführt, die bei der Darstellung der Grundlagen in diesem Kapitel benötigt werden: die aggregierten bzw. *makroskopischen* Messgrößen Verkehrsfluss, mittlere Geschwindigkeit und Verkehrsdichte.

Der *Verkehrsfluss* q ist die Anzahl N der Fahrzeuge, die einen Punkt auf der Strecke in einem Zeitraum T passieren:

$$q = \frac{N}{T}. \quad (2.1)$$

Ein typisches Aggregierungsintervall ist 1 min, wobei der Verkehrsfluss häufig in der Einheit Fahrzeuge/h (in dieser Arbeit abgekürzt als „Fzg/h“) angegeben wird.

Die *mittlere Geschwindigkeit* der Fahrzeuge, die einen Punkt auf der Strecke während des Aggregierungsintervalls T passieren ist gegeben durch die Formel:

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n. \quad (2.2)$$

Verkehrsfluss q und mittlere Geschwindigkeit \bar{v} sind *lokale*, also auf einen Punkt bezogene Messgrößen. So ist \bar{v} zu unterscheiden von der mittleren Geschwindigkeit eines oder

2 Grundlagen der Verkehrsflusstheorie

mehrerer Fahrzeuge *entlang eines Streckenabschnittes*.

Die Verkehrsdichte ρ ist definiert als Anzahl N der Fahrzeuge, die sich zu einem Zeitpunkt auf einem Streckenabschnitt der Länge L befinden:

$$\rho = \frac{N}{L}. \quad (2.3)$$

Zur Messung der Verkehrsdichte gemäß Gl. (2.3) müssen ganze Streckenabschnitte bzw. alle Zu- und Abflüsse überwacht werden, was sehr aufwendig ist. Deshalb wird die Verkehrsdichte in empirischen Untersuchungen meistens abgeschätzt, wobei häufig die Beziehung

$$\rho = \frac{q}{v} \quad (2.4)$$

verwendet wird (eine Diskussion verschiedener Abschätzungen der Dichte aus direkt gemessenen Größen ist in [19] zu finden). Dabei ist zu beachten, dass in Gl. (2.4) mit der Verkehrsdichte eine *streckenbezogene* Größe mit zwei lokalen Größen in Beziehung gesetzt wird. In der Praxis führt die Anwendung von Gl. (2.4) zu systematischen Fehlern.

Exakt ist sie für *homogene Verkehrszustände*. Hierbei handelt es sich um hypothetische Verkehrszustände in Raum und Zeit, in denen sich gleichartige Fahrzeuge mit gleicher zeitunabhängiger Geschwindigkeit und gleichen Abständen (Netto-Weglücken) zum jeweils vorausfahrenden Fahrzeug fortbewegen.

2.1 Die drei Verkehrsphasen

2.1.1 Freier und gestauter Verkehr

In Verkehrsdaten mehrspuriger Schnellstraßen lassen sich die Verkehrszustände des freien Verkehrs und des gestauten Verkehrs deutlich voneinander unterscheiden, wie Abb. 2.1 zeigt [18]: Für den freien Verkehr gibt eine starke Korrelation zwischen Verkehrsfluss und Verkehrsdichte. In der Fluss-Dichte-Ebene liegen die Zustände des freien Verkehrs auf der linken Seite einer Geraden („FG“ in Abb. 2.1) mit der Steigung [18]

$$v_{\min}^{(\text{free})} = \frac{q_{\max}^{(\text{free})}}{\rho_{\max}^{(\text{free})}}, \quad (2.5)$$

wobei $q_{\max}^{(\text{free})}$ der höchste im freien Verkehr gemessene Verkehrsfluss und $\rho_{\max}^{(\text{free})}$ die höchste im freien Verkehr gemessene Verkehrsdichte ist. Die Steigung $v_{\min}^{(\text{free})}$ der Geraden FG entspricht der niedrigsten im freien Verkehr gemessenen mittleren Fahrzeuggeschwindigkeit.

Die Verkehrszustände des gestauten Verkehrs, die sich rechts der Geraden FG befinden, liegen in einer flächenmäßig ausgedehnten Punktwolke. Bei gegebener Dichte sind die zugehörigen Werte des Verkehrsflusses stark gestreut.

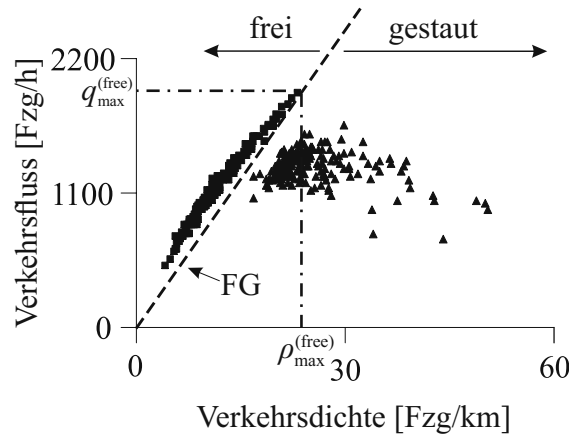


Abbildung 2.1: Typische Messdaten des Verkehrsflusses in Abhängigkeit zur Verkehrsdichte im freien und gestauten Verkehr [18].

2.1.2 Definitionen der Phasen des gestauten Verkehrs

Unter Berufung auf empirische Untersuchungen des Verkehrs auf mehrspurigen Schnellstraßen in Raum und Zeit teilt Kerner den gestauten Verkehr in zwei Verkehrsphasen auf [17, 18]: *Synchronisierter Verkehr* und *Wide Moving Jams*¹. In der von ihm begründeten Drei-Phasen-Verkehrstheorie lauten die drei Verkehrsphasen somit:

1. Freier Verkehr.
2. Synchronisierter Verkehr.
3. Wide Moving Jam.

Die Definitionen [J] und [S] der beiden Phasen des gestauten Verkehrs lauten wie folgt [17, 18]:

Wide Moving Jam [J]

Ein Wide Moving Jam ist eine lokalisierte Struktur, die sich stromaufwärts bewegt und dabei die mittlere Geschwindigkeit v_g ihrer stromabwärtigen Front beibehält. Die stromabwärtige Front eines Wide Moving Jams ist der Bereich, in dem die Fahrzeuge von der niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeit innerhalb des Wide Moving Jams, die gleich null sein kann, auf die Geschwindigkeit beschleunigen, die stromabwärts des Wide Moving Jams herrscht. Ein Wide Moving Jam behält die Geschwindigkeit v_g auch dann bei, wenn er sich durch Engstellen der Schnellstraße hindurchbewegt.

¹Zur Vermeidung schwer lesbarer Sätze wie „Es bilden sich sich bewegende breite Staus.“ wird in dieser Arbeit der englische Begriff „Wide Moving Jams“ anstelle der deutschen Übersetzung „sich bewegende breite Staus“ verwendet.

Synchronisierter Verkehr [S]

Synchronisierter Verkehr ist gestauter Verkehr, der nicht der Definition [J] von Wide Moving Jams entspricht. Im Gegensatz zu Wide Moving Jams, die sich durch Engstellen hindurchbewegen, ist Synchronisierter Verkehr oft an einer Engstelle fixiert.

Die Anwendung der Definitionen [J] und [S] auf empirische Messdaten wird in Abb. 2.2 illustriert [20]. Hier sind zwei Strukturen gestauten Verkehrs zu erkennen, in denen die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit deutlich niedriger ist als im freien Verkehr: Eine Struktur des gestauten Verkehrs bewegt sich stromabwärts mit nahezu konstanter mittlerer Geschwindigkeit der stromabwärtigen Front fort und passiert dabei auch eine Engstelle. Bei dieser Struktur handelt es sich gemäß Definition [J] um einen Wide Moving Jam. Die stromabwärtige Front der anderen Struktur des gestauten Verkehrs ist an der Engstelle fixiert. Diese Struktur entspricht Definition [S] und gehört also zur Verkehrsphase *Synchronisierter Verkehr*.

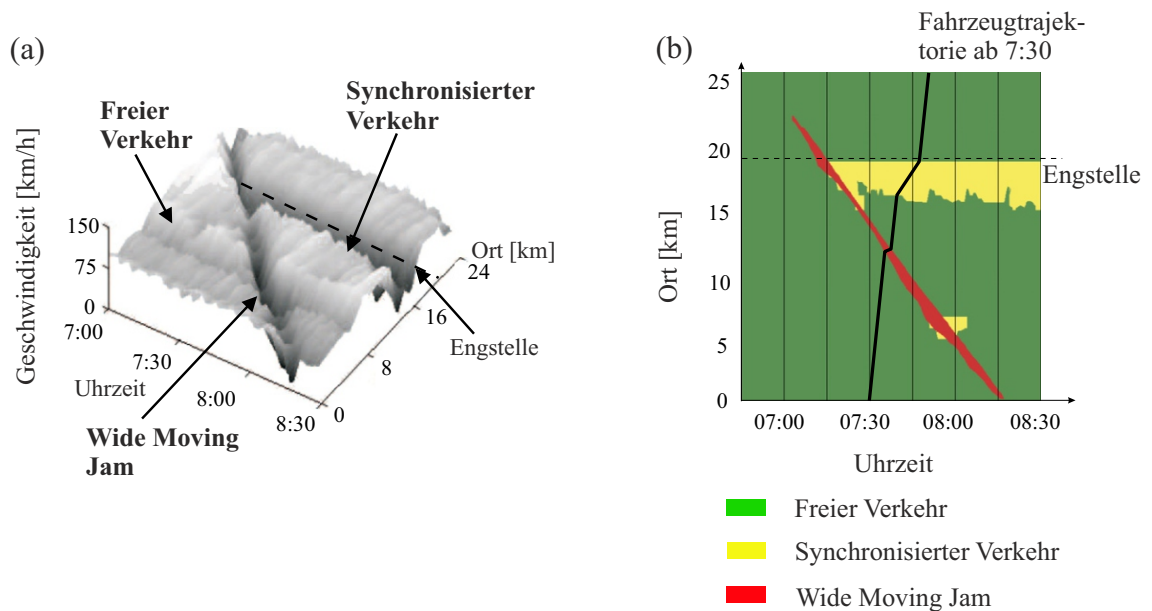


Abbildung 2.2: (a) Anwendung der Phasendefinitionen auf empirische Verkehrsdaten. (b) Illustration der drei Verkehrsphasen in Raum und Zeit [20].

Nicht alle lokalisierten Strukturen, die sich in stromaufwärtiger Richtung fortbewegen, gehören zur Verkehrsphase *Wide Moving Jam*. So sind Wide Moving Jams zu unterscheiden von sogenannten *Narrow Moving Jams*, die sich nicht mit gleichbleibender mittlerer Geschwindigkeit der stromabwärtigen Staufront durch Engstellen hindurchbewegen. Narrow Moving Jams gehören der Verkehrsphase *Synchronisierter Verkehr* an [17, 18].

Zur Unterscheidung der Verkehrsphasen *Synchronisierter Verkehr* und *Wide Moving Jam* anhand der Definitionen [J] und [S] werden also Messdaten von mehreren Punkten entlang der Schnellstraße benötigt [17, 18]. Insbesondere müssen Messdaten sowohl von

stromaufwärtigen als auch von stromabwärtigen Punkten in Bezug auf eine Engstelle vorliegen. Nur so kann entschieden werden, ob die Eigenschaft von Wide Moving Jams, sich mit zeitunabhängiger Geschwindigkeit der stromabwärtigen Staufront durch Engstellen hindurchzubewegen, erfüllt ist.

2.1.3 Charakteristische Eigenschaften von Wide Moving Jams

Charakteristische Parameter

Gemäß Definition [J] behalten Wide Moving Jams bei ihrer Fortbewegung in stromaufwärtiger Richtung die Geschwindigkeit v_g der stromabwärtigen Staufront bei. Diese Eigenschaft von Wide Moving Jams hängt damit zusammen, dass sich innerhalb eines Wide Moving Jams mehrere aufeinanderfolgende Fahrzeuge im Stillstand befinden [18]. Die mittlere Geschwindigkeit v_g der stromabwärtigen Staufront ist dadurch bedingt, dass aufeinanderfolgende Fahrzeuge mit der mittleren Zeitverzögerung τ_{del} anfangen, aus dem Stillstand zu beschleunigen. Für v_g ergibt sich [18]

$$v_g = -\frac{1}{\rho_{\text{max}}\tau_{\text{del}}}. \quad (2.6)$$

Dabei ist die maximale Verkehrsdichte ρ_{max} im Innern des Wide Moving Jams gleich dem Kehrwert der mittleren Fahrzeuglänge l_{veh} ,

$$\rho_{\text{max}} = \frac{1}{l_{\text{veh}}}. \quad (2.7)$$

Der Wert von v_g ist abhängig von verschiedenen Verkehrsparametern, z.B. der mittleren Fahrzeuglänge l_{veh} , dem Anteil von LKWs am Verkehrsfluss und dem Wetter. Für einen gegebenen Satz von Verkehrsparametern ist v_g eine Konstante. Somit ist v_g ein charakteristischer Parameter der Fortbewegung von Wide Moving Jams.

Weitere charakteristische Parameter sind der Verkehrsfluss q_{out} und die Verkehrsdichte ρ_{min} im Ausfluss aus einem Wide Moving Jam in den freien Verkehr sowie die maximale Verkehrsdichte ρ_{max} im Innern eines Wide Moving Jams [18]. Die charakteristischen Parameter von Wide Moving Jams können durch die sogenannte Linie J in der Fluss-Dichte-Ebene dargestellt werden (vgl. Abb. 2.3). Die Linie J verbindet den Punkt $(\rho_{\text{min}}, q_{\text{out}})$, der dem Verkehrsfluss und der Verkehrsdichte im Ausfluss aus einem Wide Moving Jam in den freien Verkehr entspricht, mit dem Punkt $(\rho_{\text{max}}, 0)$, der Verkehrsfluss und Verkehrsdichte im Innern des Wide Moving Jams entspricht. Die Steigung der Linie J ist gleich v_g .

2 Grundlagen der Verkehrsflusstheorie

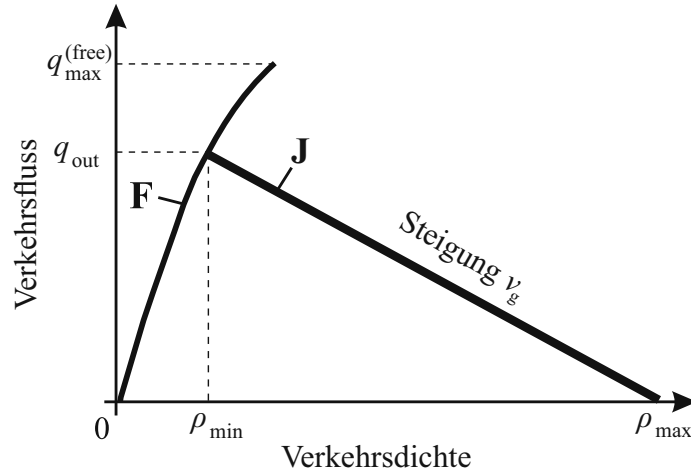


Abbildung 2.3: Die Linie J, welche die charakteristischen Parameter von Wide Moving Jams darstellt, in der Fluss-Dichte-Ebene [18].

Dynamik innerhalb von Wide Moving Jams

Wenn Fahrzeuge auf die stromabwärtige Front eines Wide Moving Jams treffen, kommen sie dort zum Stillstand. An der stromabwärtigen Front eines Wide Moving Jams ist also der Verkehrsfluss unterbrochen [18]. Stromaufwärts dieser stromabwärtigen Front, also im Innern eines Wide Moving Jams, können sich die räumliche Abstände mehrerer aufeinanderfolgender Fahrzeuge unterscheiden. Demnach gibt es im Stauinnern Gebiete, die nicht von Fahrzeugen belegt sind. Wenn die Fahrzeuge, die sich stromaufwärts dieser freien Gebiete befinden, fortbewegen, dann bewegen sich die freien Gebiete dementsprechend in stromaufwärtiger Richtung fort. Derartige Gebiete im Innern eines Wide Moving Jams, die frei von Fahrzeugen sind und die sich in stromaufwärtiger Richtung fortbewegen, werden *Moving Blanks* genannt [17, 18]. Die Dynamik im Innern eines Wide Moving Jams beschreibt Kerner als komplexe zeitlich-räumliche Abfolge von Unterbrechungen des Flusses und Moving Blanks [17, 18, 21]. Der Verkehrsfluss $q^{(\text{blanks})}$ im Innern eines Wide Moving Jams ist durch Moving Blanks bedingt, und pro Fahrspur gilt ungefähr [21]

$$q^{(\text{blanks})} = 600 \text{ Fahrzeuge/h.} \quad (2.8)$$

2.1.4 Hypothetische homogene Zustände des Synchronisierten Verkehrs

Der Zusammenhang von Verkehrsfluss und Verkehrsdichte in der Verkehrsphase *Synchronisierter Verkehr* wird in der Kerner'schen Drei-Phasen-Theorie anhand *hypothetischer homogener Zustände des Synchronisierten Verkehrs* beschrieben [17, 18].

2.1 Die drei Verkehrsphasen

Die Drei-Phasen-Verkehrstheorie beinhaltet die Hypothese, dass die hypothetischen homogenen Zustände des synchronisierten Verkehrs ein zweidimensionales Gebiet in der Fluss-Dichte-Ebene überdecken [17, 18] (vgl. Abb. 2.4 (a)). Gemäß dieser Hypothese ist die Beziehung zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und Abstand im Synchronisierten Verkehr nicht eindeutig: Bei einer gegebenen Geschwindigkeit kann ein Fahrer im Synchronisierten Verkehr den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug innerhalb einer Bandbreite von Abständen beliebig wählen (vgl. Abb. 2.4 (b)). Die Bandbreite möglicher Abstände ist durch den Sicherheitsabstand g_{safe} und den sogenannten Synchronisationsabstand G begrenzt, die jeweils von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängen. Innerhalb dieser Bandbreite hat ein Fahrzeug zu verschiedenen Zeitpunkten verschiedene Abstände zum vorausfahrenden Fahrzeug.

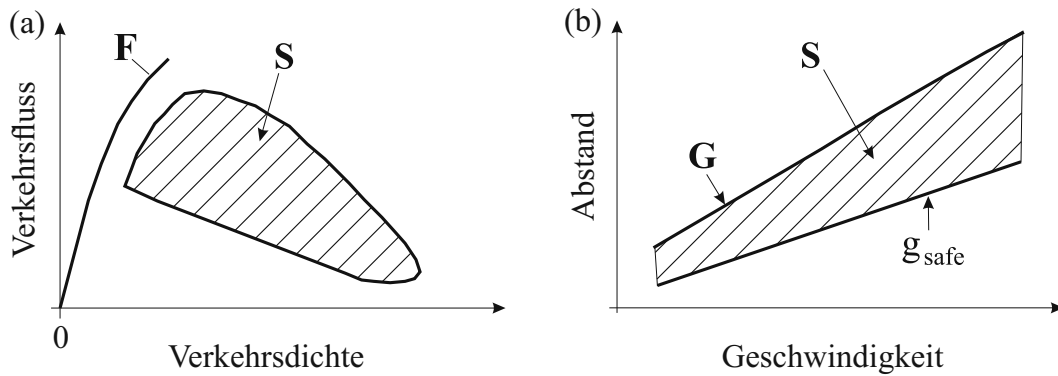


Abbildung 2.4: (a) Qualitative Darstellung der Zustände des freien Verkehrs (F) und des zweidimensionalen Gebiets der hypothetischen homogenen Zustände des Synchronisierten Verkehrs (S) in der Fluss-Dichte-Ebene. (b) Hypothetische homogene Zustände des Synchronisierten Verkehrs in der Abstand-Geschwindigkeit-Ebene [18].

2.1.5 Wachstum und Auflösung von Wide Moving Jams im Synchronisierten Verkehr

Gemäß der Drei-Phasen-Verkehrstheorie verläuft die Linie J durch das zweidimensionale Gebiet der hypothetischen homogenen Zustände des Synchronisierten Verkehrs in der Fluss-Dichte-Ebene [17, 18]: Oberhalb, unterhalb und auf der Linie J existieren homogene Zustände des Synchronisierten Verkehrs (vgl. Abb. 2.5). Dem Ausfluss aus einem Wide Moving Jam in ein Gebiet des Synchronisierten Verkehrs entsprechen die homogenen Zustände, die auf der Linie J liegen: Gemäß Definition [J] bewegen sich Wide Moving Jams auch durch Synchronisierten Verkehr mit der Geschwindigkeit v_g , die der Steigung der Linie J entspricht, fort.

2 Grundlagen der Verkehrsflusstheorie

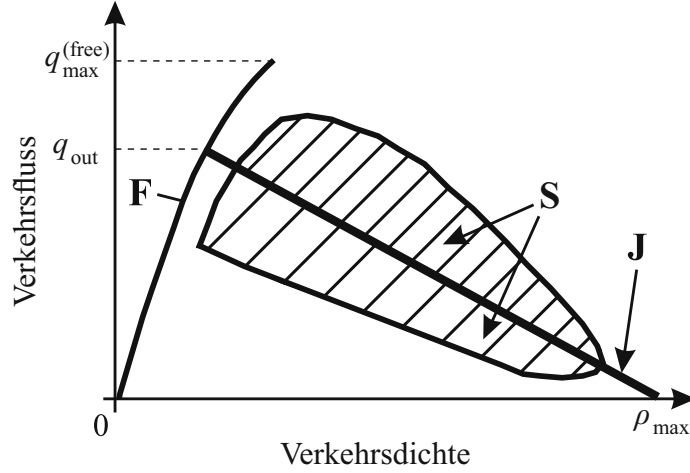


Abbildung 2.5: Verlauf der Linie J durch das zweidimensionale Gebiet der homogenen Zustände des Synchronisierten Verkehrs [18].

Befindet sich stromaufwärts eines Wide Moving Jams ein homogener Zustand des Synchronisierten Verkehrs, so kann die Fortbewegung der stromaufwärtigen Front des Wide Moving Jams ebenfalls durch eine Linie in der Fluss-Dichte-Ebene dargestellt werden.

Zwei Fälle sind in Abb. 2.6 gezeigt: In Abb. 2.6 (a) liegt Punkt k, der den betreffenden homogenen Zustand des Synchronisierten Verkehrs markiert, unterhalb der Linie J. Somit hat die Linie K, die den Punkt k mit dem Punkt $(\rho_{\max}, 0)$ verbindet und die Fortbewegung der stromaufwärtigen Front dieses Wide Moving Jams beschreibt, eine betragsmäßig niedrigere Steigung als die Linie J, und es gilt [18]

$$|v_g^{\text{up}}| > |v_g|. \quad (2.9)$$

Das heißt, dass sich dieser Wide Moving Jam mit der Zeit auflöst. Die Entstehung eines Wide Moving Jams ist in einem solchen homogenen Zustand des Synchronisierten Verkehrs nicht möglich: jeder neue Wide Moving Jam würde sich sofort auflösen. Die homogenen Zustände des Synchronisierten Verkehrs, die unterhalb der Linie J liegen, sind also stabil gegenüber der Entstehung von Wide Moving Jams.

Dagegen liegt Punkt n in Abb. 2.6 (b) oberhalb der Linie J und für die Fortbewegungsgeschwindigkeit v_g^{up} der stromaufwärtigen Front gilt in diesem Fall [18]

$$|v_g^{\text{up}}| > |v_g|. \quad (2.10)$$

Damit wächst die Länge eines Wide Moving Jams in diesem Fall mit der Zeit an. Außerdem können in homogenen Zuständen des Synchronisierten Verkehrs, die sich in der Fluss-Dichte-Ebene oberhalb der Linie J befinden, Wide Moving Jams entstehen: Eine kleine Störung im Synchronisierten Verkehr wächst mit der Zeit zu einem Wide Moving Jam an. Homogene Zustände des Synchronisierten Verkehrs, die in der Fluss-Dichte-Ebene

oberhalb der Linie J liegen, sind somit metastabil in Bezug auf die Entstehung von Wide Moving Jams.

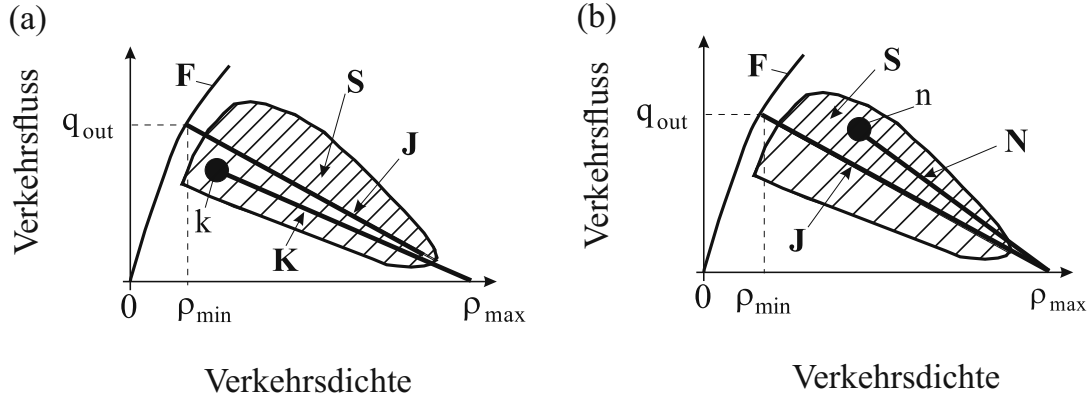


Abbildung 2.6: Darstellung stromaufwärtiger Staufronten von Wide Moving Jams, zu denen sich stromaufwärts Gebiete homogenen Synchronisierten Verkehrs befinden: (a) $|v_g^{\text{up}}| < |v_g|$, (b) $|v_g^{\text{up}}| > |v_g|$ [18].

2.1.6 Fahrzeugfolgeverhalten und Geschwindigkeitsanpassung

Das Fahrzeugfolgeverhalten gemäß der Kerner'schen Drei-Phasen-Verkehrstheorie ist in Abb. 2.7 anhand der Abstand-Geschwindigkeit-Ebene (vgl. Abb. 2.4) skizziert [18]: Ein Fahrzeug beschleunigt, wenn der räumliche Abstand g zum vorausfahrenden Fahrzeug größer ist als ein Synchronisationsabstand G , d.h. $g > G$. Ein Fahrzeug verzögert, wenn der Abstand g zum vorausfahrenden Fahrzeug kleiner ist als der Sicherheitsabstand g_{safe} . Unter den Bedingungen [18]

$$g_{\text{safe}} \leq g \leq G \quad (2.11)$$

passt ein Fahrzeug seine Geschwindigkeit der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs an. Dabei wählt es einen beliebigen Abstand g innerhalb der durch Gl. (2.11) vorgegebenen Bandbreite. Die Abstände innerhalb dieser Bandbreite entsprechen den hypothetischen homogenen Zuständen des Synchronisierten Verkehrs.

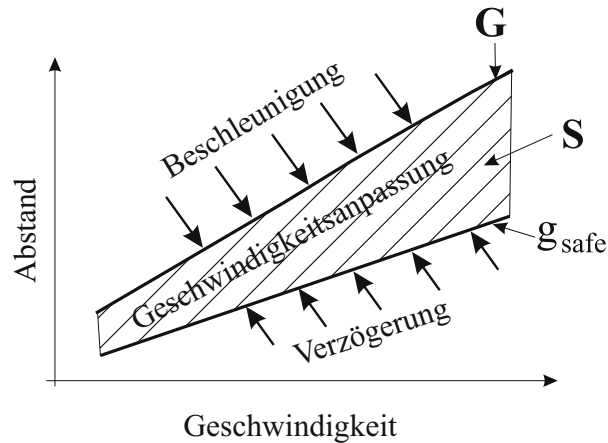


Abbildung 2.7: Qualitative Darstellung des Fahrzeugfolgeverhaltens in der Kerner'schen Drei-Phasen-Theorie [18].

Es kann zwischen „frühzeitiger“ und „später Geschwindigkeitsanpassung“ unterschieden werden [22]: *Frühzeitige Geschwindigkeitsanpassung* (englisch: „strong speed adaptation“) bedeutet, dass ein Fahrzeug, das sich einem langsamer vorausfahrenden Fahrzeug nähert, bald nach dem Unterschreiten des Synchronisationsabstandes G die geringere Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs erreicht. Dadurch nimmt es einen relativ großen Abstand (g_{strong} in Abb. 2.8) innerhalb der durch Gl. (2.11) vorgegebenen Bandbreite an. Bei der *späten Geschwindigkeitsanpassung* (englisch: „weak speed adaptation“) erreicht ein Fahrzeug hingegen erst dann die langsamere Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs, wenn es sich bereits in geringem Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug befindet (g_{weak} in Abb. 2.8). Somit entscheidet bei einer gegebenen Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs die Art der Geschwindigkeitsanpassung über den Abstand.

Da bei einer gegebenen Fahrzeuggeschwindigkeit der Verkehrsfluss und die Verkehrsdichte über den mittleren Abstand festgelegt sind, entscheidet im Synchronisierten Verkehr die Art der Geschwindigkeitsanpassung darüber, welche Zustände des Synchronisierten Verkehrs auftreten ([22], vgl. Abschnitt 2.1.5): Überwiegt die späte Geschwindigkeitsanpassung, so liegen die resultierenden Zustände des Synchronisierten Verkehrs oberhalb der Linie J in der Fluss-Dichte-Ebene. Überwiegt dagegen die frühzeitige Geschwindigkeitsanpassung, so treten Zustände des Synchronisierten Verkehrs auf, die in der Fluss-Dichte-Ebene unterhalb der Linie J liegen. Dies bedeutet, dass sich ein Wide Moving Jam auflöst, wenn sich stromaufwärts seiner stromaufwärtigen Staufront Synchronisierter Verkehr befindet, in dem die Fahrer überwiegend mit frühzeitiger Geschwindigkeitsanpassung fahren: Bei frühzeitiger Geschwindigkeitsanpassung wird der Wide Moving Jam vom Synchronisierten Verkehr absorbiert.

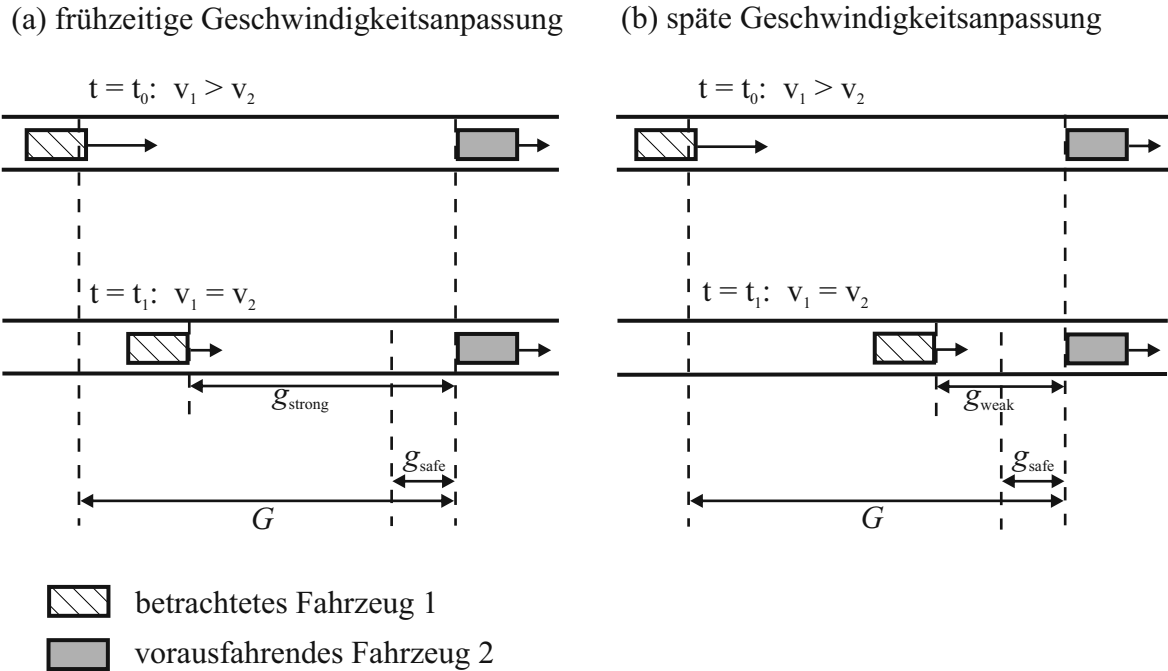


Abbildung 2.8: Anpassung der Geschwindigkeit an die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs unter der Bedingung $g_{safe} \leq g \leq G$ [18]: (a) Frühzeitige Geschwindigkeitsanpassung. (b) Späte Geschwindigkeitsanpassung.

2.1.7 Verkehrszusammenbruch und Phasenübergänge

Ein Übergang vom freien Verkehr zum gestauten Verkehr wird *Verkehrszusammenbruch* genannt [17]. In empirischen makroskopischen Messdaten ist ein Verkehrszusammenbruch als deutlicher und abrupter Einbruch der mittleren Geschwindigkeit zu erkennen, während der Verkehrsfluss auch nach dem Zusammenbruch noch genauso hohe Werte annehmen kann wie zuvor (vgl. Abb. 2.9). Aus empirischen makroskopischen Messdaten von mehreren Orten entlang einer Schnellstraße geht hervor, dass Verkehrszusammenbrüche meistens in der Nähe von Engstellen zu beobachten sind. Außerdem ist die stromabwärtige Front des aus Verkehrszusammenbrüchen resultierenden gestauten Verkehrs meistens an einer Engstelle fixiert und entspricht somit der Definition [S] der Verkehrsphase *Synchronisierter Verkehr*. Unter Berufung auf diese Beobachtungen wird der Verkehrszusammenbruch in der Drei-Phasen-Verkehrstheorie mit einem Phasenübergang vom freien Verkehr zum Synchronisierten Verkehr („F→S-Phasenübergang“) erklärt (vgl. Abb. 2.10) [17, 18].

Wenn vor einem Verkehrszusammenbruch sowohl an der betreffenden Engstelle als auch stromaufwärts und stromabwärts freier Verkehr beobachtet wurde, so handelt es sich um einen *spontanen F→S-Phasenübergang* (vgl. den F→S-Phasenübergang in Abb. 2.10). Ein spontaner F→S-Phasenübergang tritt durch das Wachstum einer intrinsischen Störung im freien Verkehr auf [17, 18].

2 Grundlagen der Verkehrsflusstheorie

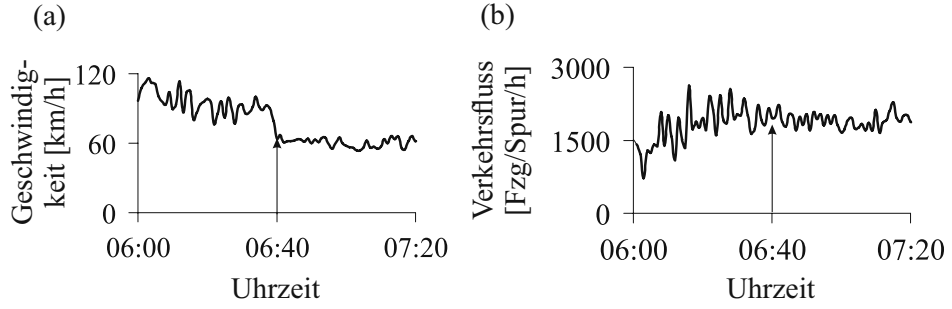


Abbildung 2.9: Empirischer Verkehrszusammenbruch auf einer Schnellstraße: Mittlere Geschwindigkeit(a) und Verkehrsfuss (b) (gemittelt über alle Spuren), gemessen mit einem Detektor. Zeitliche Mittelung über 1 min. Die Pfeile markieren den Zeitpunkt des Verkehrszusammenbruchs [18].

Ein Verkehrszusammenbruch kann auch durch eine stromabwärts einer Engstelle entstandene Struktur Synchronisierten Verkehrs oder einen Wide Moving Jam verursacht werden, wenn diese Struktur des gestauten Verkehrs auf die Engstelle trifft. In diesem Fall spricht man von einem *induzierten $F \rightarrow S$ -Phasenübergang*. Um ein empirisches Beispiel für einen induzierten $F \rightarrow S$ -Phasenübergang handelt es sich in Abb. 2.2: Hier wird der Verkehrszusammenbruch durch einen Wide Moving Jam verursacht, der bei seiner Fortbewegung in stromaufwärtiger Richtung auf eine Engstelle trifft [17, 18].

Es ist empirisch nachgewiesen worden, dass der Verkehrszusammenbruch an einer Engstelle eine probabilistische Natur hat und seine Wahrscheinlichkeit mit steigendem Verkehrsfuss anwächst [23]. Dieses empirische Resultat wird von manchen Autoren mit einem „Zufallscharakter der Straßenkapazität“ gedeutet [24–26]. Kerner widerspricht der Annahme, dass es zu jedem Zeitpunkt eine eindeutige (feste oder stochastische) Kapazität gibt [27, 28]. Gemäß seiner Drei-Phasen-Verkehrstheorie treten Verkehrszusammenbrüche, also $F \rightarrow S$ -Phasenübergänge, in metastabilem freiem Verkehr auf. Das bedeutet, dass der freie Verkehr stabil ist gegenüber kleinen Störungen. Hinreichend große Störungen des freien Verkehrs wachsen jedoch an, und es entsteht Synchronisierter Verkehr. Freier Verkehr ist metastabil, wenn der Verkehrsfuss q im freien Verkehr zwischen der *minimalen und maximalen Kapazität* der Schnellstraße, C_{\min} bzw. C_{\max} liegt [18],

$$C_{\min} \leq q \leq C_{\max}. \quad (2.12)$$

Unter der Bedingung Gl. (2.12) kann ein Verkehrszusammenbruch induziert werden. Überschreitet der Verkehrsfuss zudem einen Schwellwert q_{th} , der größer als C_{\min} sein kann, sind spontane Verkehrszusammenbrüche möglich. Im Bereich [18]

$$q_{\text{th}} \leq q \leq C_{\max}. \quad (2.13)$$

ist die Wahrscheinlichkeit für einen spontanen Verkehrszusammenbruch eine steigende Funktion des Verkehrsfusses. Bei geringeren Verkehrsfüssen als C_{\min} ist der freie Verkehr stabil,

und es kann kein Verkehrszusammenbruch stattfinden. Überschreitet der Verkehrsfluss die maximale Kapazität C_{\max} , so ist die Wahrscheinlichkeit für einen Verkehrszusammenbruch gleich eins.

Wide Moving Jams entstehen nicht spontan im freien Verkehr [18]. Im Synchronisierten Verkehr ist die spontane Bildung von Wide Moving Jams dagegen möglich. So kann es, nachdem an einer Engstelle ein $F \rightarrow S$ -Phasenübergang stattgefunden hat, im Synchronisierten Verkehr stromaufwärts der Engstelle zu einer Eigenkompression des Synchronisierten Verkehrs kommen, die als *Pinch-Effekt* bezeichnet wird [18]. Durch den Pinch-Effekt entstehen Narrow Moving Jams. Falls sich diese Narrow Moving Jams durch metastabilen Synchronisierten Verkehr fortbewegen, entwickeln sie sich zu Wide Moving Jams. Die Abfolge eines $F \rightarrow S$ -Phasenübergangs und eines anschließenden $S \rightarrow J$ -Phasenübergangs, die an verschiedenen Punkten in Raum und Zeit stattfinden, ist schematisch in Abb. 2.10 gezeigt.

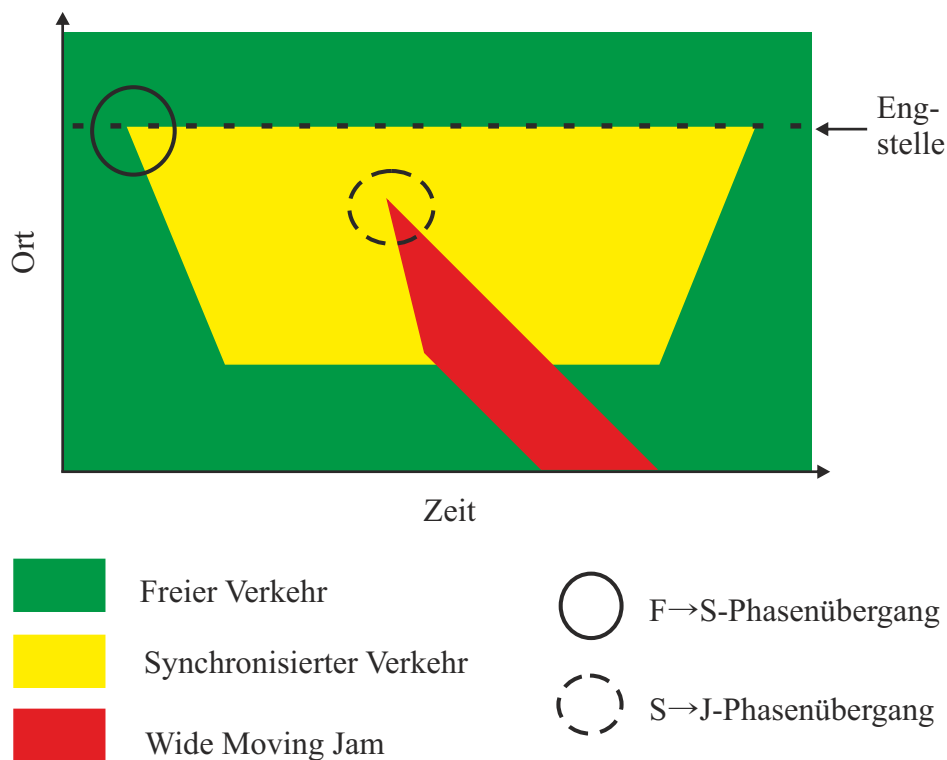


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung eines $F \rightarrow S$ - und $S \rightarrow J$ -Phasenüberganges auf einer Schnellstraße in Weg und Zeit.

2.1.8 Starke Engstellen und Mega-Jams

Ein Verkehrsmuster des gestauten Verkehrs, das sowohl aus Synchronisiertem Verkehr als auch aus Wide Moving Jams besteht, wird *general congested flow pattern* oder abgekürzt

general pattern genannt [17, 18]. Aus welchen Verkehrsphasen sich ein Muster des gestauten Verkehrs an einer Engstelle zusammensetzt, hängt Kerner zufolge von der Stärke der Engstelle ab [18, 21]. Als Maß für die Stärke einer Engstelle kann der mittlere Verkehrsfluss an einem Ort im Gebiet des gestauten Verkehrs betrachtet werden, wobei das zeitliche Mittelungsintervall deutlich größer sein muss als die Dauer, während der ein Wide Moving Jam einen Ort auf der Schnellstraße passiert. Demnach nimmt mit zunehmender Stärke der Engstelle der mittlere Verkehrsfluss im gestauten Verkehr ab [21].

Ist der mittlere Verkehrsfluss im gestauten Verkehr genauso gering wie der Verkehrsfluss innerhalb eines einzelnen Wide Moving Jam, so kann der Verkehrsfluss außerhalb und innerhalb von Wide Moving Jams nicht mehr unterschieden werden. Dies bedeutet, dass der Synchronisierte Verkehr verschwindet und die Wide Moving Jams zu einem sogenannten *Mega-Jam* verschmelzen. Wie bei einem Wide Moving Jam (vgl. Abschnitt 2.1.3) besteht auch die mikroskopische Struktur eines Mega-Jams aus Unterbrechungen des Flusses und Moving Blanks, die sich in einer komplexen zeitlichen Abfolge abwechseln [17, 18, 21].

2.2 Übersättigter innerstädtischer Verkehr an Lichtsignalanlagen

2.2.1 Untersättigter und übersättigter Verkehr

Der Verkehr auf innerstädtischen Straßen wird durch Lichtsignalanlagen (LSA) gesteuert, die den Verkehrsfluss auf den einzelnen Streckenabschnitten regelmäßig unterbrechen. Hierin besteht ein wesentlicher Unterschied zum Verkehr auf Schnellstraßen: Während auf Schnellstraßen dem gestauten Verkehr immer ein Verkehrszusammenbruch vorausgeht, ist gestauter Verkehr an Lichtsignalanlagen eingeplant, d.h. er tritt auch ohne Verkehrszusammenbruch auf.

Zur groben Unterteilung des innerstädtischen Verkehrs an Lichtsignalanlagen werden die Begriffe „*untersättigter Verkehr*“ und „*übersättigter Verkehr*“ verwendet. Diese Begriffe wurden bereits im Jahr 1955 verwendet [29] und haben sich für die Beschreibung des Verkehrs auf Straßen mit Lichtsignalanlagen etabliert (vgl. z.B. [30–32]). Definieren lassen sich *untersättigter Verkehr* und *übersättigter Verkehr* wie folgt [33].

Es herrscht *untersättigter Verkehr*, wenn das Gebiet des gestauten Verkehrs in einer Grünphase der Lichtsignalanlage vollständig abgebaut werden kann. Das heißt, dass im *untersättigten Verkehr* alle Fahrzeuge, die wegen des roten Lichtes verzögern oder anhalten müssen, während der nächsten Grünphase die Lichtsignalanlage passieren können (vgl. Abb. 2.11 (a)).

Andernfalls, wenn das Gebiet des gestauten Verkehrs nicht innerhalb einer Grünphase abgebaut werden kann, herrscht *übersättigter Verkehr*. Die Ausbildung von *übersättigtem Verkehr* ist in Abb. 2.11 (b) gezeigt: Rechts der gestrichelten Linie wächst das Gebiet des gestauten Verkehrs stromaufwärts der Lichtsignalanlage mit der Zeit deutlich an.

2.2 Übersättigter innerstädtischer Verkehr an Lichtsignalanlagen

Bei einem *Verkehrszusammenbruch an einer Lichtsignalanlage* handelt es sich um einen Übergang vom untersättigten Verkehr zum übersättigten Verkehr. Ein Verkehrszusammenbruch ereignet sich in Abb. 2.11 zum Zeitpunkt $T^{(B)}$.

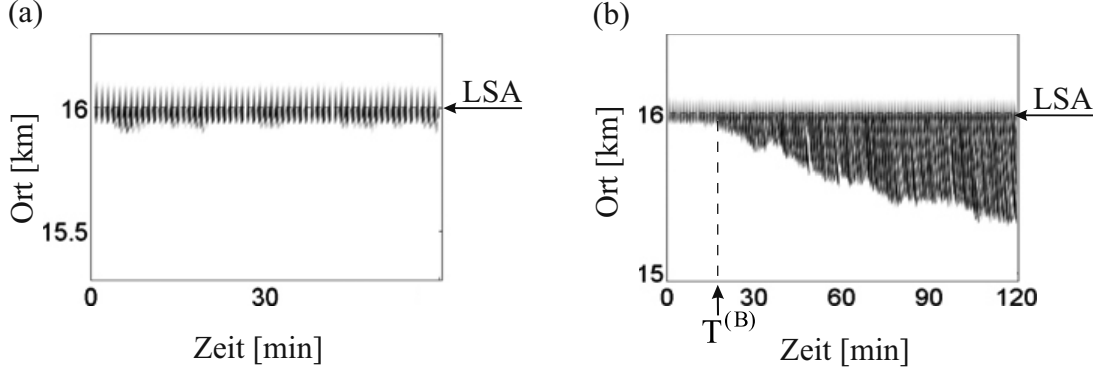


Abbildung 2.11: Innerstädtischer Verkehr an einer Lichtsignalanlage (LSA): Untersättigter Verkehr (a) und übersättigter Verkehr (b). Darstellung der Fahrzeuggeschwindigkeiten aus Verkehrsflusssimulationen durch Graustufen (weiß entspricht 55 km/h, schwarz entspricht 0 km/h) [33].

Gemäß der Kerner’schen Drei-Phasen-Theorie des innerstädtischen Verkehrs [34–36] ereignen sich Verkehrszusammenbrüche an Lichtsignalanlagen nicht zwangsläufig dadurch, dass der mittlere Verkehrsfluss \bar{q}_{in} stromaufwärts der Lichtsignalanlage im zeitlichen Mittel eine *feste* Kapazität C_{cl} überschreitet, die in der „klassischen“ Theorie des Verkehrs an Lichtsignalanlagen [30–32, 37–43] gemäß der Gleichung [41]

$$C_{\text{cl}} = q_{\text{sat}} \frac{T_{\text{G}}^{(\text{eff})}}{\theta} \quad (2.14)$$

mit dem *Sättigungsfluss* q_{sat} , der *effektiven Gründauer* $T_{\text{G}}^{(\text{eff})}$ und der Dauer θ eines Zyklus der Lichtsignalanlage definiert wird. In Gl. (2.14) wird angenommen, dass während der Dauer T_{G} die Fahrzeuge mit zeitlich unverändertem Fluss q_{sat} die Lichtsignalanlage passieren. Die effektive Gründauer ist kürzer als die tatsächliche Gründauer, weil in der Realität die vordersten Fahrzeuge einer Moving Queue mit größeren Zeitlücken die Lichtsignalanlage passieren, bevor sich ein bis auf Fluktuationen zeitlich unveränderter Sättigungsfluss q_{sat} einstellt [42].

Anstelle einer festen Kapazität wird die Möglichkeit und Wahrscheinlichkeit von Verkehrszusammenbrüchen an einer Lichtsignalanlage in der Kerner’schen Drei-Phasen-Theorie anhand der *minimalen und maximalen Kapazität* C_{min} bzw. C_{max} und eines Schwellwertes q_{th}^{B} für spontane Verkehrszusammenbrüche erklärt [33–36] und ist in Abb. 2.12 skizziert: Falls der mittlere Verkehrsfluss \bar{q}_{in} stromaufwärts der Lichtsignalanlage kleiner ist als die minimale Kapazität C_{min} [33],

2 Grundlagen der Verkehrsflusstheorie

$$\bar{q}_{\text{in}} < C_{\text{min}}, \quad (2.15)$$

so ist der untersättigte Verkehr stabil (Bereich I in Abb. 2.12). Die minimale Kapazität C_{min} wird mit der klassischen Kapazität aus Gl. (2.14) identifiziert [33],

$$C_{\text{min}} = C_{\text{cl}}. \quad (2.16)$$

Bei mittleren Verkehrsflüssen \bar{q}_{in} minimaler und maximaler Kapazität [33],

$$C_{\text{min}} \leq \bar{q}_{\text{in}} \leq C_{\text{max}}, \quad (2.17)$$

ist der untersättigte Verkehr *metastabil*, d.h. Verkehrszusammenbrüche können induziert werden (Bereich II in 2.12 (a)). Zudem können unter den Bedingungen [33]

$$q_{\text{th}}^{(\text{B})} \leq \bar{q}_{\text{in}} \leq C_{\text{max}} \quad (2.18)$$

spontane Verkehrszusammenbrüche auftreten, deren Wahrscheinlichkeit mit \bar{q}_{in} wächst (Bereich III). Unter der Bedingung [33]

$$\bar{q}_{\text{in}} > C_{\text{max}} \quad (2.19)$$

ist der untersättigte Verkehr instabil (Bereich IV): Schon für kleine Beobachtungszeiträume, die in der Größenordnung von θ liegen, ist die Wahrscheinlichkeit für einen spontanen Verkehrszusammenbruch gleich eins. Falls der Verkehr bereits zusammengebrochen ist, bedeuten Verkehrsflüsse im Bereich IV, dass der übersättigte Verkehr dauerhaft fortbesteht. Die empirischen Ergebnisse der vorliegenden Arbeit beziehen sich auf dauerhaften übersättigten Verkehr, in dem die Verkehrsflüsse stets dem Bereich IV angehören.

Im Gegensatz zu Abb. 2.12 (a) ist in 2.12 (b) der Schwellwert $q_{\text{th}}^{(\text{B})}$ kleiner als die maximale Kapazität C_{max} , sodass ein Bereich V auftritt, auf den die Bedingungen [33]

$$C_{\text{min}} \leq \bar{q}_{\text{in}} \leq q_{\text{th}}^{(\text{B})} \quad (2.20)$$

zutreffen. In Bereich V tritt *sich auflösender übersättigter Verkehr* auf. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, dass sich das Anwachsen und Auflösen des Gebietes mit gestautem Verkehr zufällig abwechseln [33, 36]. Die Teilabbildungen 2.12 (a) und (b) beziehen sich auf verschiedene Anteile von Fahrzeugen des gesamten Verkehrsflusses, die während der Grünphase die Lichtsignalanlage erreichen: Beim in Abb. 2.12 (a) gezeigten Grenzfall erreicht ein großer Anteil der Fahrzeuge während der Grünphase die Lichtsignalanlage, und in Abb. 2.12 (b) ist der Anteil der Fahrzeuge, die während der Grünphase die Lichtsignalanlage erreichen, gering.

2.2 Übersättigter innerstädtischer Verkehr an Lichtsignalanlagen

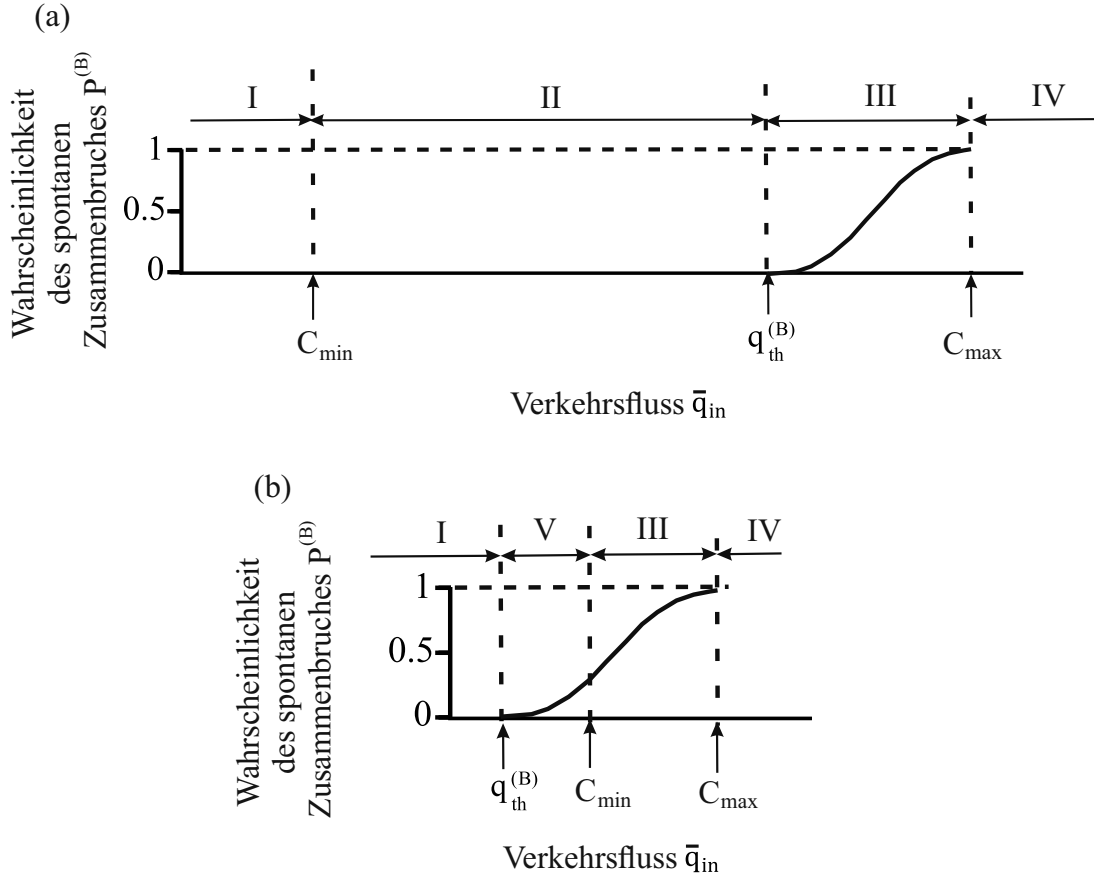


Abbildung 2.12: Kerner'sche Drei-Phasen-Theorie des innerstädtischen Verkehrs: Wahrscheinlichkeit des spontanen Verkehrszusammenbruchs in Abhängigkeit des Verkehrsflusses \bar{q}_{in} [33].

Sowohl im untersättigten als auch im übersättigten Verkehr können Verkehrsmuster auftreten, die sich den Verkehrsphasen des gestauten Verkehrs zuordnen lassen: Eine Warteschlange an einer Lichtsignalanlage mit stillstehenden Fahrzeugen, deren stromabwärtige und stromaufwärtige Front sich in stromaufwärtiger Richtung fortbewegen, entspricht der Verkehrsphase Wide Moving Jam. Warteschlangen stromaufwärts einer Lichtsignalanlage werden in dieser Arbeit als *Moving Queues* bezeichnet. Zusätzlich zu den Moving Queues tritt gemäß der Kerner'schen Drei-Phasen-Theorie auch Synchronisierter Verkehr im untersättigten und im übersättigten Verkehr auf: Kerner zufolge hängt der Verkehrszusammenbruch an einer Lichtsignalanlage mit dem Auftreten sich bewogender Strukturen des Synchronisierten Verkehrs (*moving synchronized flow patterns*) im untersättigten Verkehr zusammen [33–36].

Das Auftreten von Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs wird ausführlich in Kerners Ausarbeitungen seiner Drei-Phasen-Theorie des innerstädtischen Verkehrs [34–36] sowie im Übersichtsartikel [33] behandelt. Da die Ergebnisse der vorliegen-

den Arbeit nur den übersättigten Verkehr betreffen, werden in den folgenden Abschnitten die charakteristischen Verkehrsmuster des übersättigten Verkehrs, die durch Moving Queues und Synchronisierten Verkehr gekennzeichnet sind, vorgestellt.

2.2.2 Moving Queues im übersättigten Verkehr

Wird bei Grün die Moving Queue an einer Lichtsignalanlage abgebaut, so beschleunigen die Fahrzeuge, die sich in der Warteschlange befinden, nacheinander mit zeitlicher Verzögerung aus dem Stillstand. Phänomenologisch entspricht diese Folge von Anfahrvorgängen dem Beschleunigen von Fahrzeugen in der stromabwärtigen Staufront eines Wide Moving Jam: Auch für die Moving Queue an einer Lichtsignalanlage kann eine mittlere Verzögerungszeit τ_{del} zwischen dem Beginn aufeinanderfolgender Anfahrvorgänge und eine mittlere Fahrzeuglänge l_{veh} angenommen werden, die für einen gegebenen Satz von Verkehrsparametern zeitunabhängig sind. Daraus ergibt sich gemäß Gl. (2.6) eine Fortbewegung der stromabwärtigen Front einer Warteschlange mit zeitunabhängiger mittlerer Geschwindigkeit.

Im übersättigten Verkehr können sich Moving Queues in stromaufwärtiger Richtung über den Punkt x_{dis} hinweg fortbewegen, ohne sich dabei aufzulösen. Moving Queues entsprechen im übersättigten innerstädtischen Verkehr der Verkehrsphase „Wide Moving Jam“ auf Schnellstraßen.

Ein Muster des übersättigten Verkehrs, das aus Moving Queues besteht, ist in Abb. 2.13 dargestellt [22]: In Abb. 2.13 (a) sind Fahrzeugtrajektorien in Raum und Zeit abgebildet. Es sind Moving Queues zu sehen, die sich in regelmäßiger zeitlicher Abfolge in stromaufwärtiger Richtung fortbewegen. In Abb. 2.13 (b) ist der Geschwindigkeitsverlauf entlang Fahrzeugtrajektorie 1 aus Abb. 2.13 (a) gezeigt: Man sieht, wie das Fahrzeug in mehreren Moving Queues zum Stehen kommt und zwischen diesen Stillständen Gebiete durchfährt, in denen es sich von einer Moving Queue zur nächsten fortbewegt. Die mittlere Dauer der Stillstände in den einzelnen Moving Queues ändert sich nicht in Abhängigkeit vom Abstand zur Lichtsignalanlage.

Verkehrsmuster wie das in Abb. 2.13 gezeigte entsprechen der Vorstellung von übersättigtem Verkehr gemäß der „klassischen“ Theorie des Verkehrs an Lichtsignalanlagen, auf deren Grundlage einige Methoden der innerstädtischen Verkehrsplanung und der Steuerung von Lichtsignalanlagen entwickelt worden sind [30–32, 37–43]. Abb. 2.13 ist das Ergebnis einer Simulation des Verkehrsflusses auf einem einspurigen Streckenabschnitt mit einer Lichtsignalanlage an Position $x = 5$ km.

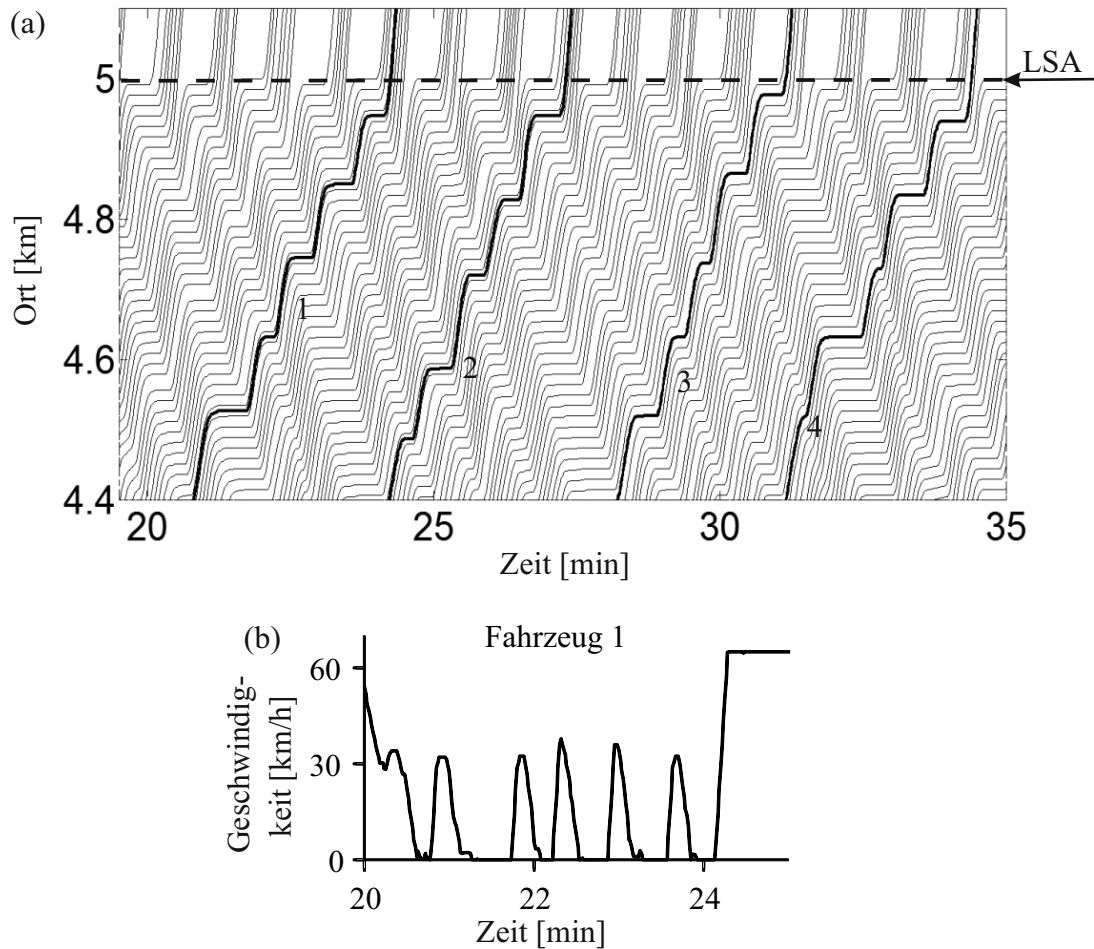


Abbildung 2.13: Räumlich-zeitliche Struktur des übersättigten Verkehrs mit Moving Queues. (a) Fahrzeugtrajektorien in Ort und Zeit auf einem 600 m langen Teilstreckenabschnitt stromaufwärts der LSA. Gezeigt ist jede zweite Fahrzeugtrajektorie. (b) Geschwindigkeitsverlauf entlang der in (a) gezeigten Fahrzeugtrajektorie 1 [22].

2.2.3 Synchronisierter Verkehr im übersättigten Verkehr

Dass im übersättigten Verkehr auch Strukturen des Synchronisierten Verkehrs entstehen können, folgerten Kerner *et al.* im Jahr 2013 in einer theoretischen Untersuchung aus numerischen Verkehrsflusssimulationen [22]. Demzufolge können sich Moving Queues in einem gewissen Abstand zur Lichtsignalanlage während ihrer Fortbewegung in stromaufwärtiger Richtung auflösen. Ein Muster des übersättigten Verkehrs, in dem sich Moving Queues auflösen, ist in Abb. 2.14 gezeigt: In Abb. 2.14 (a) ist zu sehen, dass sich die Moving

2 Grundlagen der Verkehrsflusstheorie

Queues in einem Bereich zwischen 100 und 300 Metern Abstand zur Lichtsignalanlage auflösen. Anstatt in einer regelmäßigen Folge von Moving Queues einige Male stillzustehen, kommen die Fahrzeuge nur ein oder zwei Mal in geringem Abstand zur Position der Lichtsignalanlage zum Stehen (vgl. Abb. 2.14 (b)).

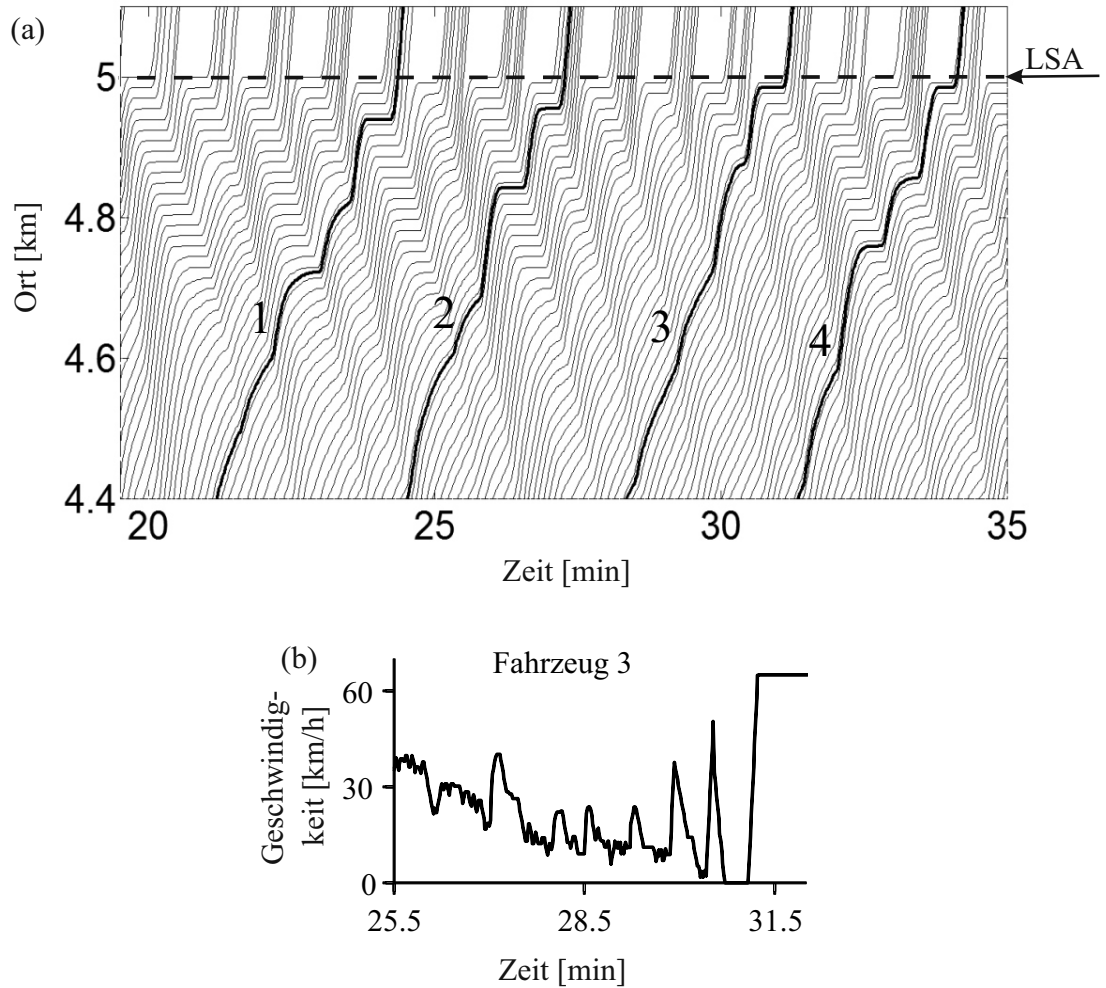


Abbildung 2.14: Räumlich-zeitliche Struktur des übersättigten Verkehrs, in dem sich synchronisierter Verkehr bildet. (a) Fahrzeugtrajektorien in Ort und Zeit auf einem 600 m langen Teilstreckenabschnitt stromaufwärts der LSA. Gezeigt ist jede zweite Fahrzeugtrajektorie. (b) Geschwindigkeitsverlauf entlang der in (a) gezeigten Fahrzeugtrajektorie 3 [22].

Zur Simulation der Auflösung von Moving Queues und Entstehung des Synchronisierten Verkehrs verwendeten Kerner *et al.* in [22] ein stochastisches Kerner-Klenov-Modell [44, 45]. Die Verkehrszustände, die mit diesem Modell erzeugt werden, sind in Abb. 2.15 (a)

2.2 Übersättigter innerstädtischer Verkehr an Lichtsignalanlagen

in der Fluss-Dichte-Ebene dargestellt: Die Geschwindigkeit im freien Verkehr, die der Steigung der Linie F der Zustände des freien Verkehrs entspricht, beträgt hier 60 km/h. Die Linie J verbindet den Punkt der maximalen Dichte ρ_{\max} mit dem Punkt, der zum Sättigungsfluss q_{out} gehört. Wie in der schematischen Darstellung in Abb. 2.5 gibt es Zustände des Synchronisierten Verkehrs oberhalb und unterhalb der Linie J. In Abb. 2.15 (b) sind die Zustände des Modells in der Abstand-Geschwindigkeit-Ebene gezeigt.

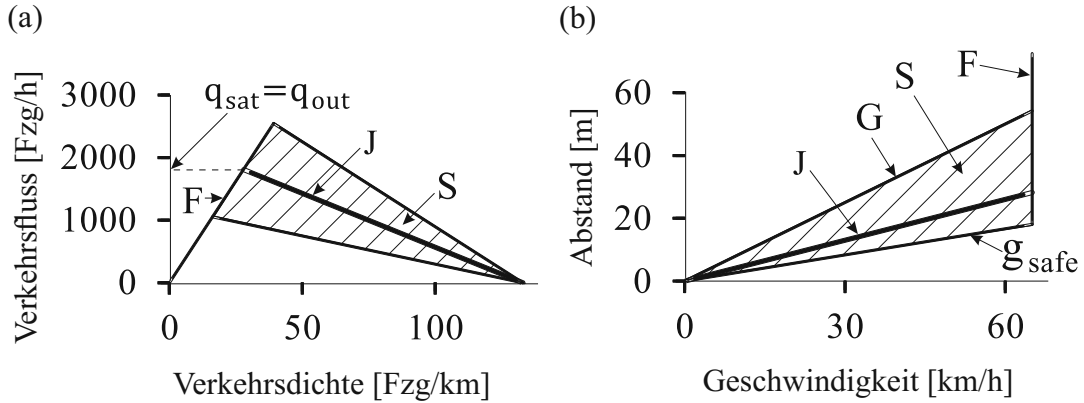


Abbildung 2.15: Zustände des stochastischen Kerner-Klenov-Modells, das zur Erzeugung von Synchronisiertem Verkehr im übersättigten Verkehr verwendet wurde, (a) in der Fluss-Dichte-Ebene und (b) in der Abstand-Geschwindigkeit-Ebene [22].

Die Auflösung von Moving Queues im übersättigten Verkehr an einer Lichtsignalanlage lässt sich gemäß der Drei-Phasen-Verkehrstheorie anhand der Geschwindigkeitsanpassung von Fahrzeugen erklären (vgl. Abschnitt 2.1.6). Demnach entsteht Synchronisierter Verkehr, wenn Fahrzeuge, die sich dem stromaufwärtigen Ende einer Moving Queue nähern und verzögern, mit frühzeitiger Geschwindigkeitsanpassung fahren. So bleiben die Abstände zwischen den verzögernden Fahrzeugen so groß, dass die resultierenden Verkehrszustände sich in der Fluss-Dichte-Ebene unterhalb der Linie J befinden. Existieren derartige stabile Zustände des Synchronisierten Verkehrs am stromaufwärtigen Ende einer Moving Queue, so bewegt sich die stromaufwärtige Front v_g^{up} mit betragsmäßig geringerer Geschwindigkeit fort als die stromabwärtige Front v_g (vgl. Abb. 2.16): Die Moving Queue löst sich auf und geht in Synchronisierten Verkehr über, wie in Abschnitt 2.1.6 für Wide Moving Jams auf Schnellstraßen beschrieben wurde.

Zum Nachweis des Zusammenhangs zwischen der Art der Geschwindigkeitsanpassung und der Entstehung von Synchronisiertem Verkehr im übersättigten innerstädtischen Verkehr integrierten Kerner *et al.* einen Koeffizienten ϵ der Geschwindigkeitsanpassung in das stochastische Kerner-Klenov-Modell [22]. Mit der Wahl des Koeffizienten ϵ kann die Verzögerungswahrscheinlichkeit eines Fahrzeugs, dessen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug gemäß Gl. (2.11) kleiner ist als der Synchronisierungsabstand, variiert werden.

2 Grundlagen der Verkehrsflusstheorie

So sind die verschiedenen Verkehrsmuster aus den Abb. 2.13 und 2.14 mit demselben Verkehrsflussmodell unter Verwendung verschiedener Werte für den Koeffizienten ϵ der Geschwindigkeitsanpassung generiert worden. Die Auswirkung der Art der Geschwindigkeitsanpassung auf die Entstehung von Synchronisiertem Verkehr im übersättigten Verkehr wurde von Hermanns ausführlich untersucht [46].

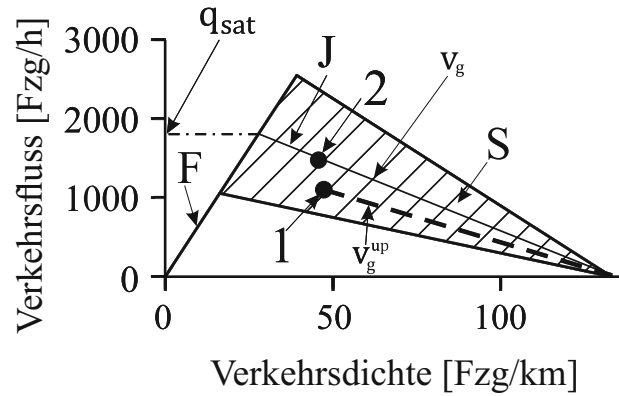


Abbildung 2.16: Darstellung der stromaufwärtigen Front (Punkt 1) und stromabwärtigen Front einer Moving Queue (Punkt 2) in der Fluss-Dichte-Ebene. Unter der Bedingung $|v_{up}| < |v_g|$ lösen sich Moving Queues auf [47].

3 Empirische Datengrundlage und empirische makroskopische Eigenschaften des übersättigten innerstädtischen Verkehrs

In diesem Kapitel wird die Datengrundlage beschrieben, die der empirischen Untersuchung des übersättigten Verkehrs in der vorliegenden Arbeit zugrunde liegt. Es werden die untersuchten Streckenabschnitte innerstädtischer Straßen vorgestellt und die Messtechniken zur Erfassung der verwendeten mikroskopischen und makroskopischen Daten diskutiert. Außerdem werden anhand makroskopischer Verkehrsdaten die typischen Arten empirischer innerstädtischer Verkehrszusammenbrüche vorgestellt: zum einen der Einbruch der Geschwindigkeit und zum anderen der gleichzeitige Einbruch von Geschwindigkeit und Verkehrsfluss.

Die verwendeten makroskopischen Verkehrsdaten stammen von stationären Detektoren: An den untersuchten Streckenabschnitten sind Videodetektoren fest installiert. Bei den verwendeten mikroskopischen Verkehrsdaten handelt es sich um anonymisierte GPS-Daten, die von Navigationsgeräten in Fahrzeugen gemessen werden. Der Schwerpunkt des empirischen Teils der vorliegenden Arbeit liegt auf den mikroskopischen zeitlich-räumlichen Eigenschaften des übersättigten innerstädtischen Verkehrs, die in Kapitel 4 behandelt werden. Die Untersuchung dieser mikroskopischen Eigenschaften erfolgt auf der Grundlage von GPS-Daten aus Navigationsgeräten in Fahrzeugen. Da solche anonymisierten GPS-Daten von Navigationsgeräten nur für einen Anteil von Fahrzeugen des gesamten Verkehrsflusses vorliegen, werden sie durch makroskopische Daten stationärer Detektoren ergänzt. Im Gegensatz zu dieser Kombination makroskopischer und mikroskopischer Daten in Kapitel 4 beruht die Diskussion empirischer innerstädtischer Verkehrszusammenbrüche in diesem Kapitel ausschließlich auf makroskopischen Daten stationärer Detektoren. Messdaten der stationären Detektoren im innerstädtischen Düsseldorfer Straßennetz wurden vom Amt für Verkehrsmanagement der Landeshauptstadt Düsseldorf für den Zeitraum 2011–2014 zur Verfügung gestellt.

3.1 Infrastruktur der untersuchten Streckenabschnitte

Für die Untersuchung des übersättigten innerstädtischen Verkehrs in der vorliegenden Arbeit sind drei Streckenabschnitte von Straßen des Düsseldorfer Verkehrsnetzes ausgewählt worden:

- Der 630 m lange Abschnitt der Völklinger Straße in Nordrichtung zwischen Südring und Fährstraße (vgl. 3.1 (a)). Dieser Abschnitt ist über den Großteil der Strecke zweispurig und fächert sich im Bereich der Kreuzung mit der Fährstraße auf vier Spuren auf.
- Ein 640 m langer Abschnitt des Südrings in Ostrichtung, der an der Abzweigung zur Völklinger Straße endet (3.1 (b)).
- Der 450 m lange Abschnitt des Südrings in Ostrichtung zwischen Völklinger Straße und Volmerswerther Straße (3.1 (c)). Dieser Abschnitt ist größtenteils dreispurig und wird im Bereich der Kreuzung mit der Volmerswerther Straße um eine Linksabbiegerspur erweitert.

Die Wahl dieser Abschnitte erfolgte aus den folgenden Gründen:

- Alle Streckenabschnitte erstrecken sich über mehrere hundert Meter. Nur an den stromabwärtigen Enden der Abschnitte befinden sich Lichtsignalanlagen, ansonsten wird der Verkehrsfluss nicht durch Lichtsignalanlagen unterbrochen. Aufgrund dieser Eigenschaften ist die räumliche Ausdehnung der auftretenden Verkehrsmuster hinreichend groß, sodass sie in den vorhandenen anonymisierten GPS-Daten untersucht werden können.
- An allen Streckenabschnitten ist jeweils ein stationärer Detektor angebracht (bezeichnet als „DV“, „DSI“ und „DSII“ in Abb. 3.1). Es liegen also für die betrachteten Tage Verkehrsdaten aus zwei voneinander unabhängigen Quellen vor: stationären Detektoren und Navigationsgeräten in Fahrzeugen. So ist ein Vergleich von *makroskopischen* Detektordaten und *mikroskopischen* GPS-Daten der Navigationsgeräte möglich.
- Auf den ausgewählten Streckenabschnitten lassen sich Verkehrszusammenbrüche und übersättigter Verkehr häufig beobachten. Insbesondere sind für den Abschnitt der „Völklinger Straße“ Verkehrszusammenbrüche und ihre Wahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des Verkehrsflusses von Koller *et al.* [48, 49] detailliert untersucht worden.

3.1 Infrastruktur der untersuchten Streckenabschnitte

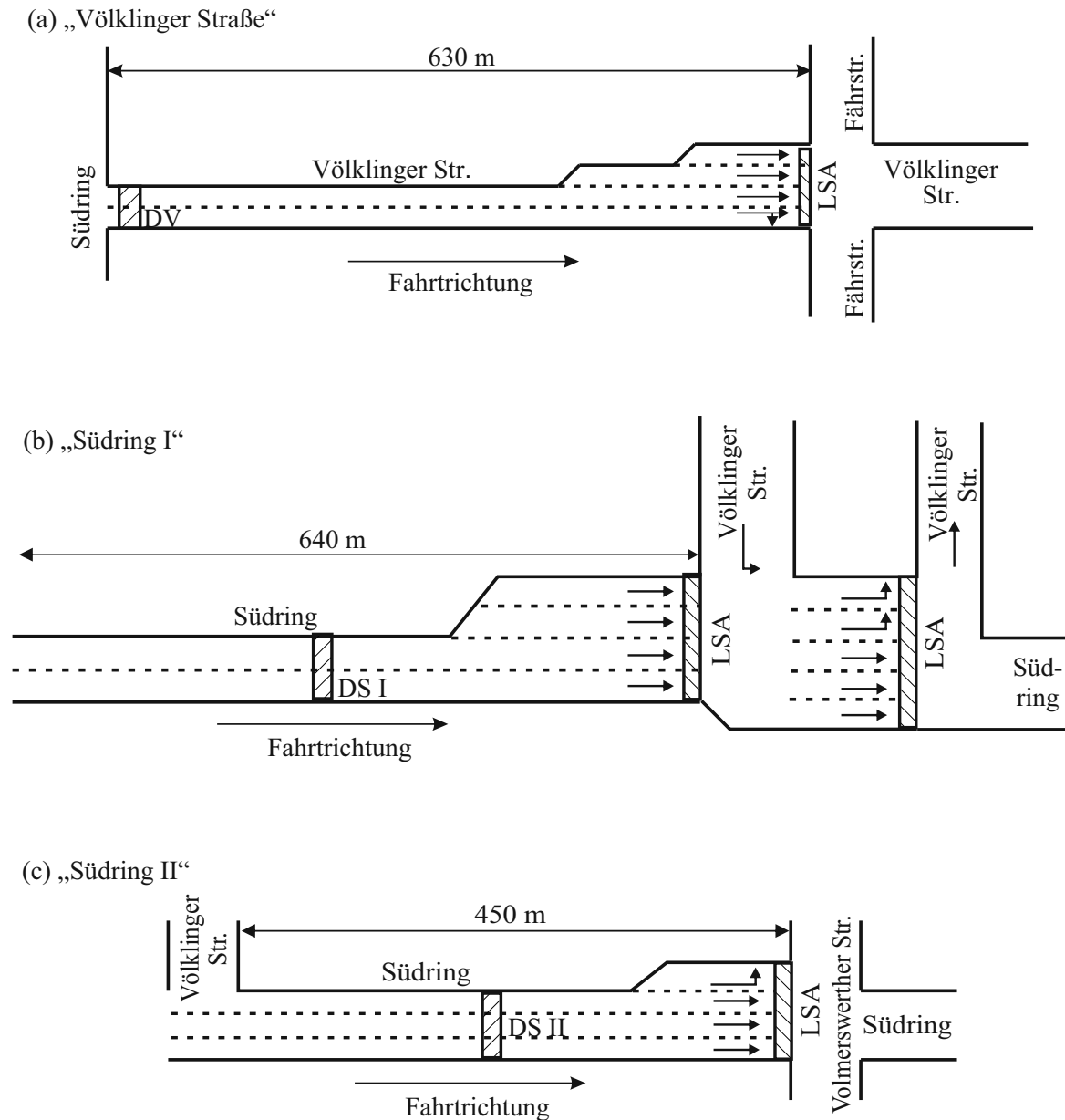


Abbildung 3.1: Schematische Darstellungen der betrachteten Streckenabschnitte (a) der Völklinger Straße (2013–2014) und (b),(c) des Südrings in Düsseldorf. „DV“ „DSI“ und „DSII“ bezeichnen stationäre Detektoren, „LSA“ Lichtsignalanlagen. Die Geschwindigkeit ist auf den Streckenabschnitten „Völklinger Straße“ und „Südring I“ auf 60 km/h begrenzt, auf dem Streckenabschnitt „Südring I“ beträgt die Geschwindigkeitsbegrenzung am stromaufwärtigen Ende 80 km/h und wird nach 200 m auf 60 km/h herabgesetzt. Im Jahr 2011 war auf dem Abschnitt „Völklinger Straße“ die äußerste linke Spur stromaufwärts der Lichtsignalanlage eine Linksabbiegerspur.

3.2 Makroskopische Datenerfassung basierend auf stationären Detektoren

Bei den stationären Detektoren an den untersuchten Streckenabschnitten handelt es sich um Videodetektoren (vgl. Abb. 3.2). Ein Videodetektor liefert ein Kamerabild eines Teilstückes der Fahrbahn, das in Abb. 3.2 (b) von den Punkten x_1 und x_2 begrenzt wird. Mittels Farb- bzw. Kontrastabgleich kann im Kamerabild des Videodetektors ermittelt werden, ob das erfasste Teilstück der Fahrbahn von Fahrzeugen überfahren wird. Wird ein ankommendes Fahrzeug am Punkt x_1 registriert, so wird bei diesem Detektionsereignis ein Zähler um eins erhöht.

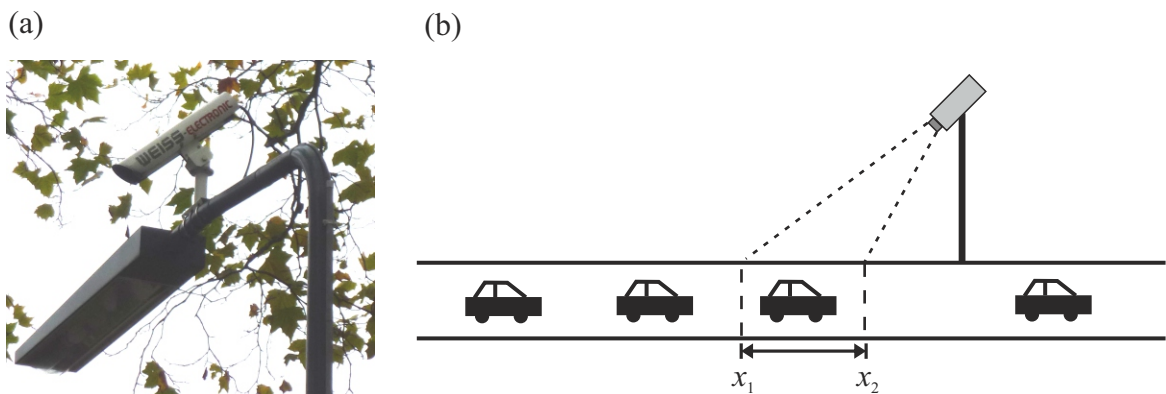


Abbildung 3.2: Datenerfassung mit einem stationären Videodetektor: (a) Foto eines stationären Videodetektors (Firma „Weiss Electronic“), montiert an einen Laternenmast. (b) Schematische Darstellung des Vorgangs der Datenerfassung.

Der Verkehrsfluss ergibt sich aus dem Wert N des Zählers am Ende eines Aggregierungsintervalls der Länge T gemäß (2.1):

$$q = \frac{N}{T}$$

(vgl. den einleitenden Abschnitt von Kapitel 2). Bei den Detektordaten dieser Arbeit ist die Länge des Aggregierungsintervalls stets 1 Minute.

Die Geschwindigkeit v eines Fahrzeugs beim Durchfahren des betrachteten Streckenteilstückes ergibt sich aus den Zeitpunkten t_1 und t_2 , zu denen das vordere Ende des Fahrzeugs die Punkte x_1 und x_2 erreicht, gemäß

$$v = \frac{t_2 - t_1}{x_2 - x_1}. \quad (3.1)$$

Die mittlere Geschwindigkeit aller Fahrzeuge, die den Videodetektor während eines Aggregierungsintervalls passieren, wird gemäß (2.2) ermittelt:

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n.$$

Mit Videodetektoren ist die fahrspuraufgelöste Bestimmung der Messgrößen q und \bar{v} möglich. Da jedoch für die vorliegenden anonymisierten GPS-Daten (vgl. Abschnitt 3.4) aus Navigationsgeräten die Fahrspuren der betreffenden Fahrzeuge unbekannt sind, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch für die Detektordaten auf die spurgenaue Betrachtung verzichtet, und es werden stets über alle Fahrspuren aggregierte bzw. gemittelte Werte verwendet. Neben den in diesem Abschnitt beschriebenen Videodetektoren ist die Erfassung von Verkehrsflüssen und mittleren Geschwindigkeiten auch mit Radarsensoren, Infrarotdetektoren oder in die Fahrspur eingelassenen Induktionsschleifen möglich.

3.3 Empirische innerstädtische Verkehrszusammenbrüche: Übergänge vom untersättigten zum übersättigten Verkehr

Innerstädtische Verkehrszusammenbrüche, d.h. Übergänge vom untersättigten zum übersättigten Verkehr auf innerstädtischen Straßen mit Lichtsignalanlage, können anhand makroskopischer Daten stationärer Detektoren, die den Verkehrsfluss und die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit messen, beobachtet werden. Wenn das Gebiet des übersättigten Verkehrs die Detektorposition erreicht, zeigt sich dies durch einen Abfall der am Detektor gemessenen mittleren Fahrzeuggeschwindigkeiten. Dabei sollte der Abstand des Detektors zur Lichtsignalanlage hinreichend groß sein, damit im untersättigten Verkehr der gestaute Verkehr, der sich während der Rotphasen an der Lichtsignalanlage bildet, den Detektor nicht erreicht (2.2.1).

Aus früheren Untersuchungen in verschiedenen Ländern ist der folgende zeitliche Verlauf der Messgrößen Verkehrsfluss und mittlere Geschwindigkeit bekannt (vgl. [50, 51]): Bei niedrigen Verkehrsflüssen wird an den Detektoren, die sich in hinreichend großer Entfernung zur Lichtsignalanlage befinden, freier Verkehr beobachtet. Nach deutlichem Anstieg des Verkehrsflusses wird am Detektor ein Verkehrszusammenbruch, d.h. ein deutlicher Einbruch der mittleren Geschwindigkeit, beobachtet. Ein Verkehrszusammenbruch entspricht an einer Straße mit Lichtsignalanlage dem Übergang vom untersättigten zum übersättigten Verkehr. Einige Minuten nach dem Verkehrszusammenbruch zeigt sich dann am Detektor eine Erholung des freien Verkehrs [47].

In den folgenden Abschnitten 3.3.1 und 3.3.2 diskutieren wir einige empirische Beispiele des oben beschriebenen Verhaltens auf der Grundlage von Daten der Detektoren an den in dieser Arbeit untersuchten Streckenabschnitten in Düsseldorf (vgl. Abb. 3.1).

3.3.1 Einbruch der Geschwindigkeit

Ein erstes Beispiel für einen Verkehrszusammenbruch am Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ ist in Abb. 3.3 gezeigt. In Teilabbildung (b) erkennt man in der Ansicht über mehrere Stunden (linke Seite) einen steilen Anstieg des mittleren Verkehrsflusses zwischen 6:00 und 6:20 Uhr. Bei hohen Verkehrsflüssen werden zunächst auch hohe Fahrzeuggeschwindigkeiten gemessen (6:20–7:19 Uhr), bis die mittlere Geschwindigkeit stark und abrupt einbricht und sich erst zwei Stunden später wieder erholt. Hingegen ist für den Verkehrsfluss zwar zunächst auch ein Rückgang, aber kein vergleichbar starker Abfall zu beobachten (mittlere Geschwindigkeiten und Verkehrsflüsse, gemittelt über die Zeitintervalle nach und vor dem Verkehrszusammenbruch, sind in den Tabellen 3.1 und 3.2 am Ende dieses Abschnittes aufgelistet).

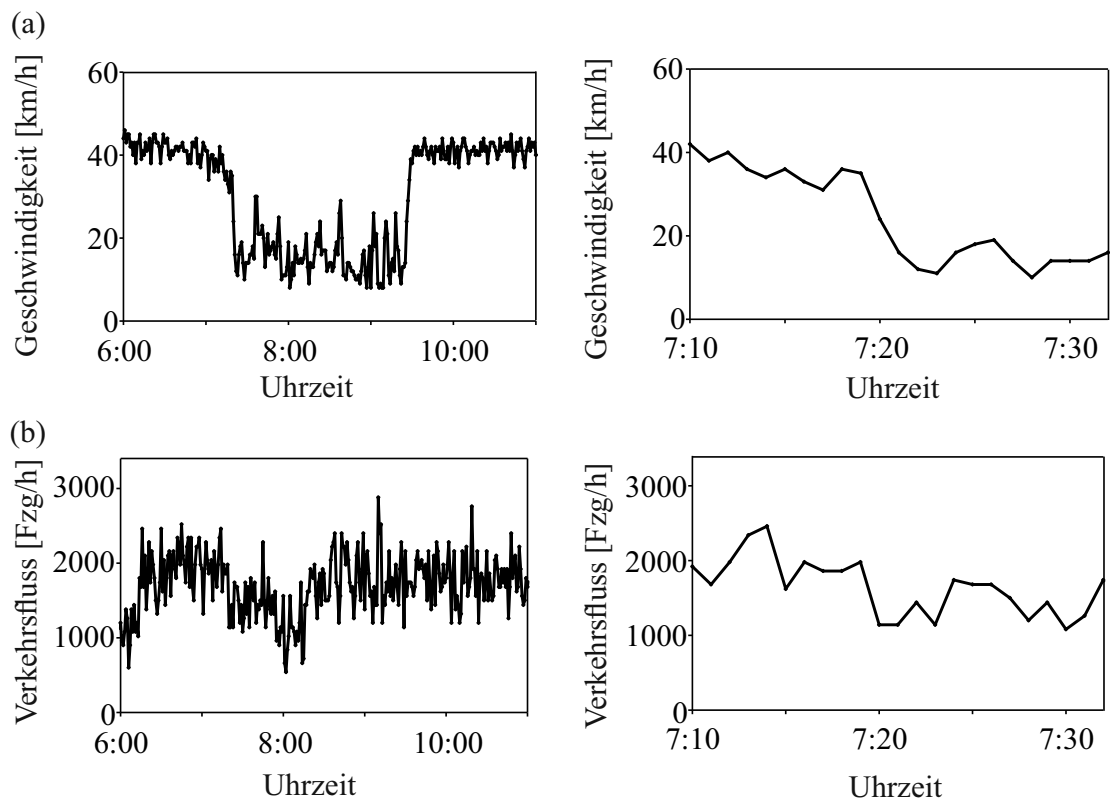


Abbildung 3.3: Empirischer Verkehrszusammenbruch auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1) am 21. Dezember 2011: Zeitliche Entwicklung (a) der durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeit und (b) des Verkehrsflusses über das gesamte Zeitintervall übersättigten Verkehrs (links) und über den Teilabschnitt, in dem sich der Verkehrszusammenbruch ereignet (rechts). Minütlich gemittelte Daten des stationären Detektors „DV“ aus Abb. 3.1.

3.3 Empirische innerstädtische Verkehrszusammenbrüche

Es fällt auf, dass die mittlere Geschwindigkeit vor dem Verkehrszusammenbruch um 40 km/h schwankt und damit deutlich unter der erlaubten Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h liegt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Detektor („DV“ in Abb. 3.1) kurz hinter der Einmündung vom Südring liegt und die Fahrzeuge beim Passieren des Detektors noch nicht vollständig auf die Freiflussgeschwindigkeit beschleunigt haben.

Beim in Abb. 3.4 gezeigten Verkehrszusammenbruch auf der Völklinger Straße am 17. Mai 2013 ist der abrupte Einbruch der Geschwindigkeit noch deutlicher zu erkennen als im vorangegangenen Beispiel (vgl. Teilabbildung (a), rechts). Nach dem Einbruch sind ab 8:00 Uhr starke Schwankungen der Geschwindigkeit zu beobachten, dauerhaft erholt sich die Geschwindigkeit aber erst ab 9:14 Uhr. Doch auch hier ist der Einbruch der Geschwindigkeit deutlich stärker als der Abfall des Flusses. Erst wenn sich die mittlere Geschwindigkeit wieder erholt, ist ein deutlicher Rückgang des Flusses, der mit dem typischen Rückgang des Verkehrsaufkommens nach der Morgenspitze zusammenhängt, erkennbar.

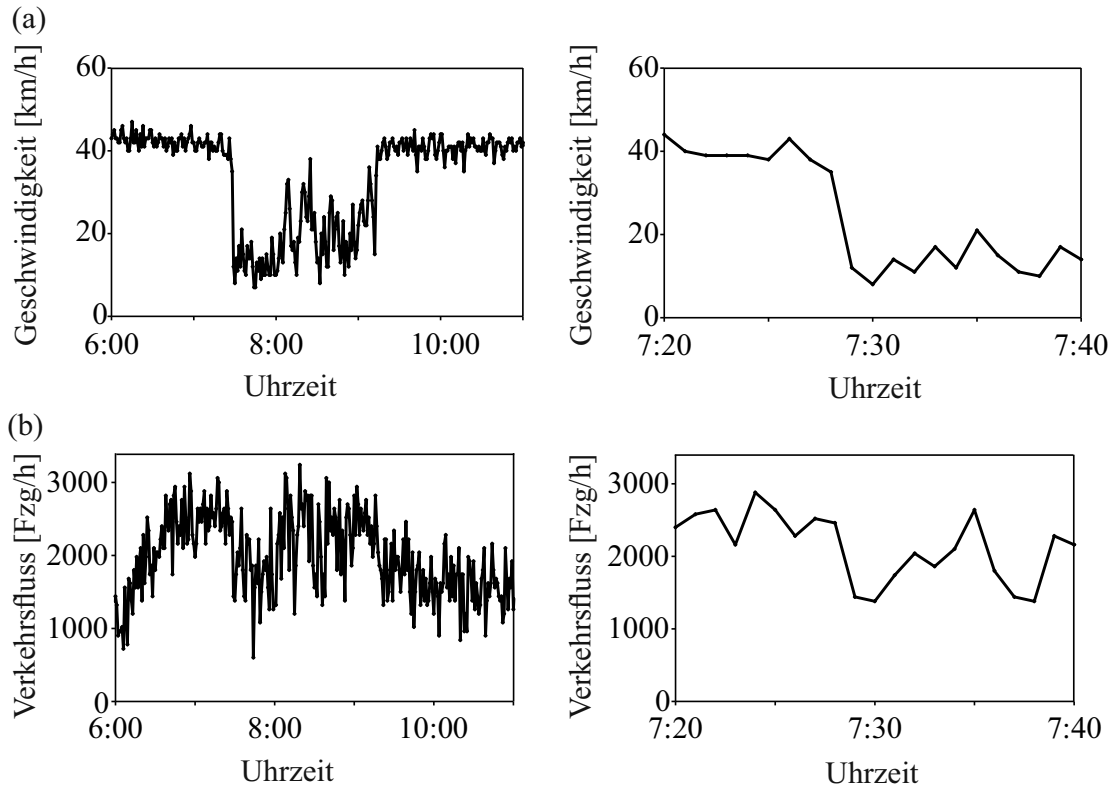


Abbildung 3.4: Empirischer Verkehrszusammenbruch auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1) am 17. Mai 2013: Zeitliche Entwicklung (a) der durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeit und (b) des Verkehrsflusses über das gesamte Zeitintervall übersättigten Verkehrs (links) und über den Teilabschnitt, in dem sich der Verkehrszusammenbruch ereignet (rechts). Minütlich gemittelte Daten des stationären Detektors „DV“ aus Abb. 3.1.

3 Empirische Datengrundlage und empirische makroskopische Eigenschaften...

Während für die zuvor diskutierten Verkehrszusammenbrüche auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ der Rückgang des Verkehrsflusses deutlich schwächer ist als der Abfall der Geschwindigkeit, so ist der Verkehrsfluss im Beispiel aus Abb. 3.5 vom selben Streckenabschnitt sogar genauso groß wie vor dem Verkehrszusammenbruch. Über den Zeitraum zwischen Einbruch und Erholung gemittelt (7:23–8:42 Uhr), ist der Verkehrsfluss 98 % so hoch wie vor dem Zusammenbruch (Mittelung über den Zeitraum von 6:32–7:20 Uhr).

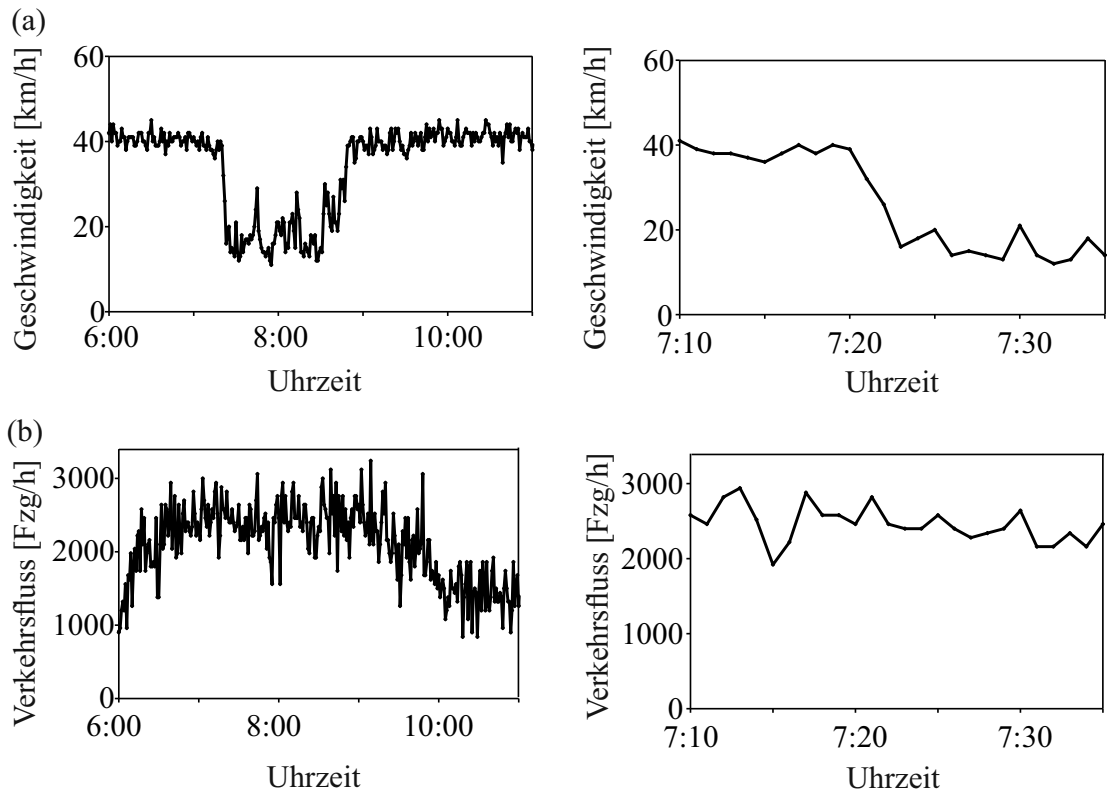


Abbildung 3.5: Empirischer Verkehrszusammenbruch auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1) am 9. September 2013: Zeitliche Entwicklung (a) der durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeit und (b) des Verkehrsflusses über das gesamte Zeitintervall übersättigten Verkehrs (links) und über den Teilabschnitt, in dem sich der Verkehrszusammenbruch ereignet (rechts). Minütlich gemittelte Daten des stationären Detektoren „DV“ aus Abb. 3.1.

3.3 Empirische innerstädtische Verkehrszusammenbrüche

Wie im zuvor diskutierten Beispiel ist auch beim in Abb. 3.6 der Verkehrsfluss während des übersättigten Verkehrs im Mittel genauso groß wie vor dem Verkehrszusammenbruch: Von 7:27 Uhr bis 8:44 Uhr liegt der Verkehrsfluss im zeitlichen Mittel bei 103 % des zeitlichen Mittelwerts im Zeitintervall von 6:25 Uhr bis 7:24 Uhr vor dem Verkehrszusammenbruch.

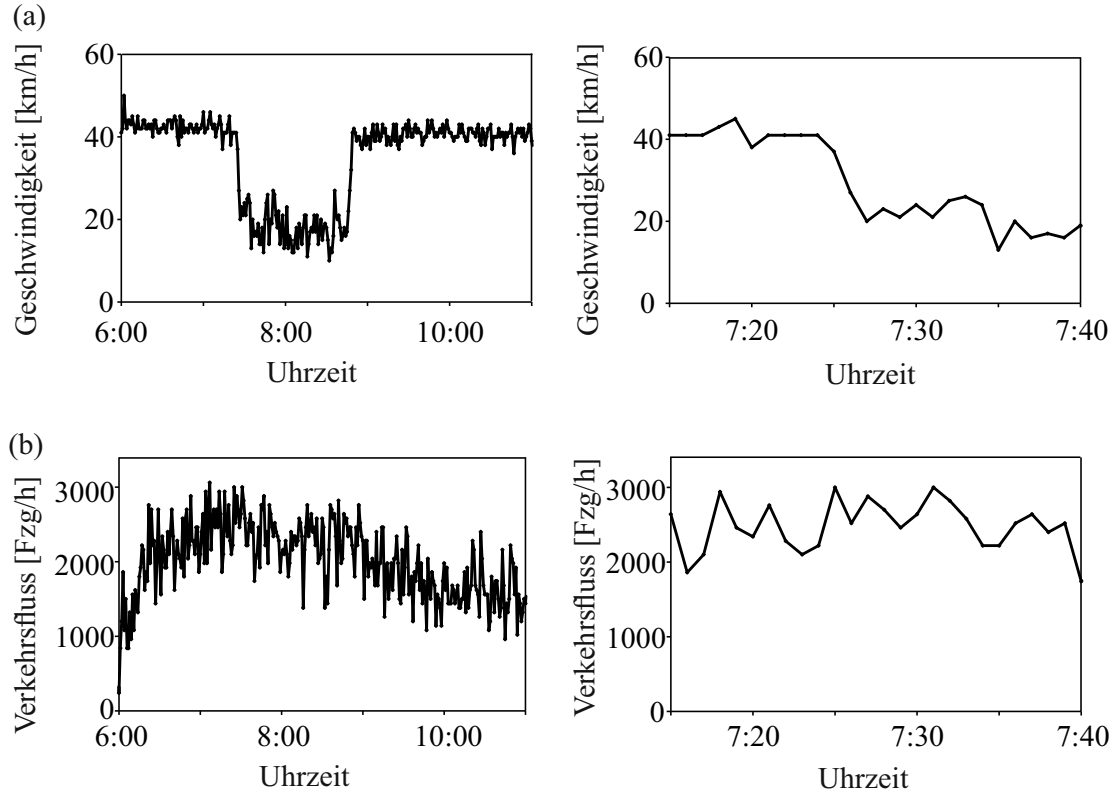


Abbildung 3.6: Empirischer Verkehrszusammenbruch auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1) am 29. Oktober 2013: Zeitliche Entwicklung (a) der durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeit und (b) des Verkehrsflusses über das gesamte Zeitintervall übersättigten Verkehrs (links) und über den Teilabschnitt, in dem sich der Verkehrszusammenbruch ereignet (rechts). Minütlich gemittelte Daten des stationären Detektoren „DV“ aus Abb. 3.1.

Ein weiteres Beispiel für einen Verkehrszusammenbruch auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ ist in Abb. 3.7 gezeigt. Um 7:26 Uhr beginnt der Einbruch der Geschwindigkeit, und von 7:29–9:02 Uhr herrscht übersättigter Verkehr. Über dieses Intervall des übersättigten Verkehrs gemittelt, beträgt die mittlere Geschwindigkeit 17 km/h, und weicht in manchen Minuten deutlich nach oben ab. Trotz dieser Schwankungen ist auch in diesem Beispiel der Abfall der Geschwindigkeit deutlich stärker als der Rückgang des Verkehrsflusses.

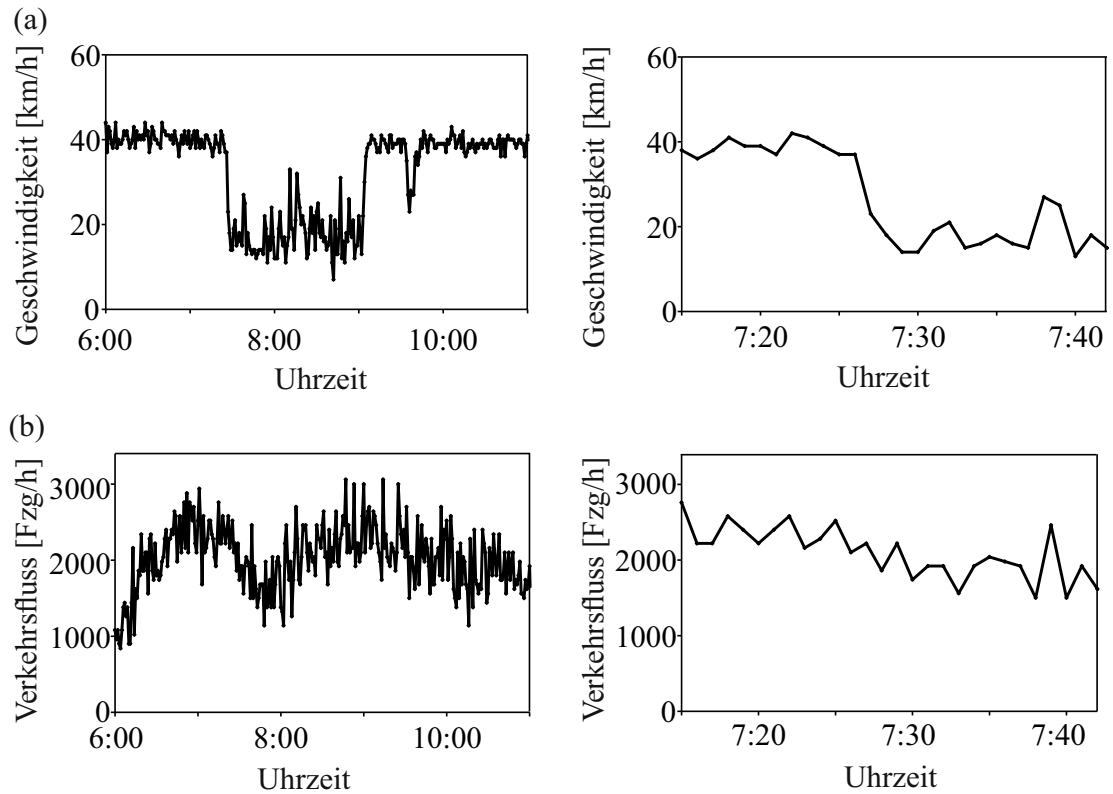


Abbildung 3.7: Empirischer Verkehrszusammenbruch auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1) am 19. Dezember 2013: Zeitliche Entwicklung (a) der durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeit und (b) des Verkehrsfusses über das gesamte Zeitintervall übersättigten Verkehrs (links) und über den Teilabschnitt, in dem sich der Verkehrszusammenbruch ereignet (rechts). Minütlich gemittelte Daten des stationären Detektoren „DV“ aus Abb. 3.1.

Wurden bisher Verkehrszusammenbrüche am Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ betrachtet, so ist in Abb. 3.8 ein erstes Beispiel für einen Verkehrszusammenbruch auf dem „Südring I“ gezeigt. Dieses Beispiel zeigt qualitative Eigenschaften, die mit den Verkehrszusammenbrüchen auf der „Völklinger Straße“ übereinstimmen: Ab 7:24 Uhr bricht die mittlere Geschwindigkeit ein, und es folgt ein lang anhaltendes Zeitintervall, in dem niedrige Geschwindigkeiten gemessen werden. Die Messdaten zu diesem Verkehrszusammenbruch auf dem „Südring I“ weisen auf einige quantitative Unterschiede zu den Verkehrszusammenbrüchen auf der „Völklinger Straße“ hin. So ist im untersättigten Verkehr vor dem Verkehrszusammenbruch die mittlere Geschwindigkeit näher an der erlaubten Höchstgeschwindigkeit als in den Daten der „Völklinger Straße“. Dies liegt daran, dass sich am Streckenabschnitt „Südring I“ der Detektor nicht in unmittelbarer Nähe des Straßenbeginns oder einer Lichtsignalanlage befindet. Auch die mittlere Geschwindigkeit

3.3 Empirische innerstädtische Verkehrszusammenbrüche

nach dem Verkehrszusammenbruch (7:24–9:55 Uhr) ist im Durchschnitt höher als die mittleren Geschwindigkeiten, die im übersättigten Verkehr auf der „Völklinger Straße“ gemessen werden. Dies gilt sowohl für den absoluten Wert als auch für das Verhältnis zur Geschwindigkeit im untersättigten Verkehr (52 % des Durchschnitts im Zeitintervall 6:44–7:12 vor dem Zusammenbruch). Dennoch ist der Abfall der Geschwindigkeit auch in diesem Beispiel stärker als der Rückgang des Verkehrsflusses, der im übersättigten Verkehr durchschnittlich noch 78 % des Wertes vor dem Zusammenbruch erreicht (Betrachtung derselben Zeitintervalle).

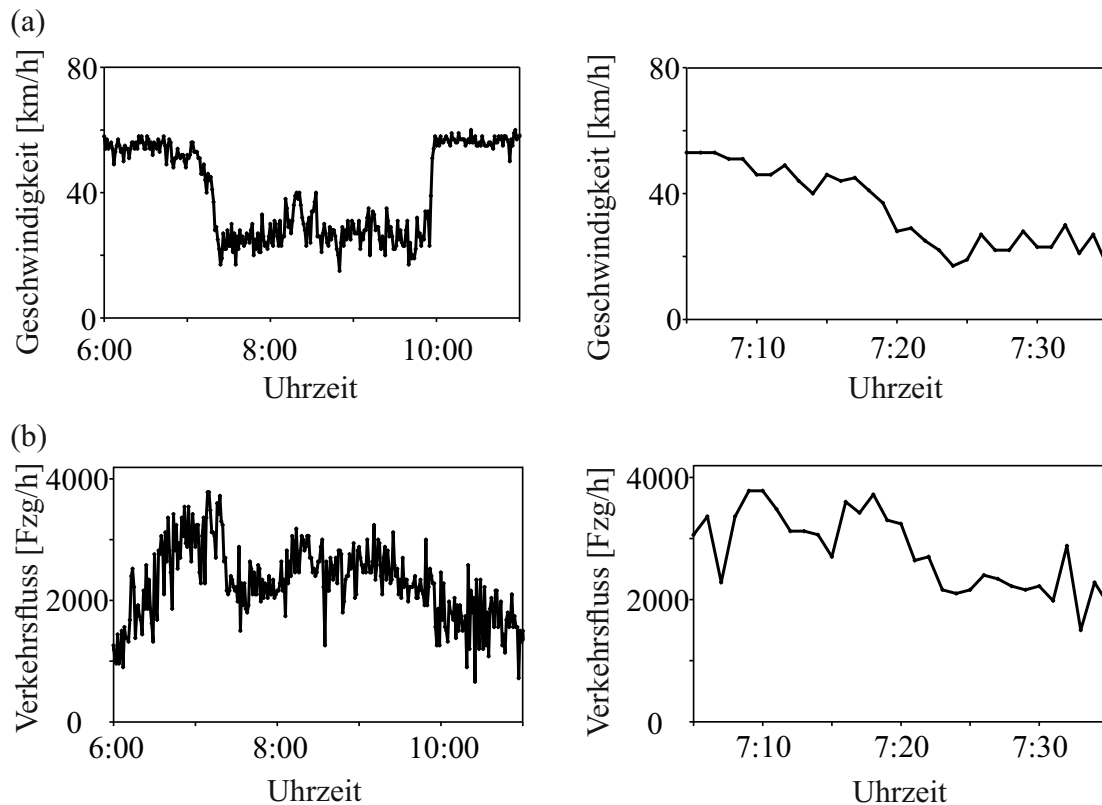


Abbildung 3.8: Empirischer Verkehrszusammenbruch auf dem Streckenabschnitt „Südring I“ (vgl. Abb. 3.1) am 12. April 2013 (Vormittag): Zeitliche Entwicklung (a) der durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeit und (b) des Verkehrsflusses über das gesamte Zeitintervall übersättigten Verkehrs (links) und über den Teilabschnitt, in dem sich der Verkehrszusammenbruch ereignet (rechts). Minütlich gemittelte Daten des stationären Detektoren „DS I“ aus Abb. 3.1.

3 Empirische Datengrundlage und empirische makroskopische Eigenschaften...

Dass die Geschwindigkeit an einem Tag mehrmals auf demselben Streckenabschnitt einbrechen kann, zeigt das in Abb. 3.9 gezeigte Datenbeispiel, das wie das vorige Beispiel am 12. April 2013 auf dem „Südring I“ erhoben wurde. Während die mittlere Geschwindigkeit im übersättigten Verkehr (14:46–17:30 Uhr) im Durchschnitt noch 44 % der Geschwindigkeit vor dem Zusammenbruch (13:43–14:42 Uhr) beträgt, ist kein Rückgang für den Verkehrsfluss zu beobachten, der im Durchschnitt sogar auf 111 % des Verkehrsflusses vor dem Geschwindigkeitseinbruch ansteigt.

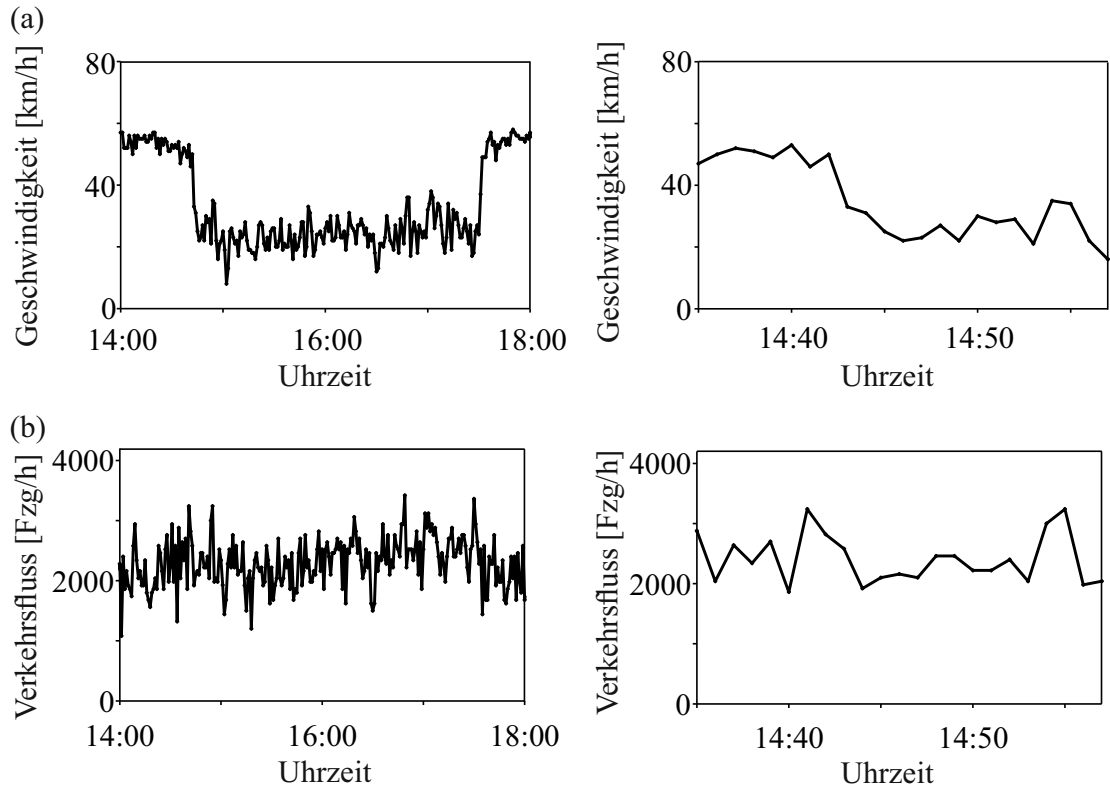


Abbildung 3.9: Empirischer Verkehrszusammenbruch auf dem Streckenabschnitt „Südring I“ (vgl. Abb. 3.1) am 12. April 2013 (Nachmittag): Zeitliche Entwicklung (a) der durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeit und (b) des Verkehrsflusses über das gesamte Zeitintervall übersättigten Verkehrs (links) und über den Teilabschnitt, in dem sich der Verkehrszusammenbruch ereignet (rechts). Minütlich gemittelte Daten des stationären Detektors „DS I“ aus Abb. 3.1.

3.3 Empirische innerstädtische Verkehrszusammenbrüche

In Abb. 3.10 ist ein weiterer Verlauf der mittleren Geschwindigkeit und des Verkehrsflusses auf dem Südring gezeigt. Bald nach dem morgendlichen Anwachsen des Verkehrsflusses kommt es ab 6:52 Uhr zu einem deutlichen Abfall der Geschwindigkeit. Mit durchschnittlich 30 km/h ist die mittlere Geschwindigkeit des übersättigten Verkehrs in diesem Beispiel höher als in allen anderen in diesem Abschnitt diskutierten Beispielen von Verkehrszusammenbrüchen. Dennoch ist der Abfall der Geschwindigkeit auch hier deutlich stärker als der Rückgang des Verkehrsflusses.

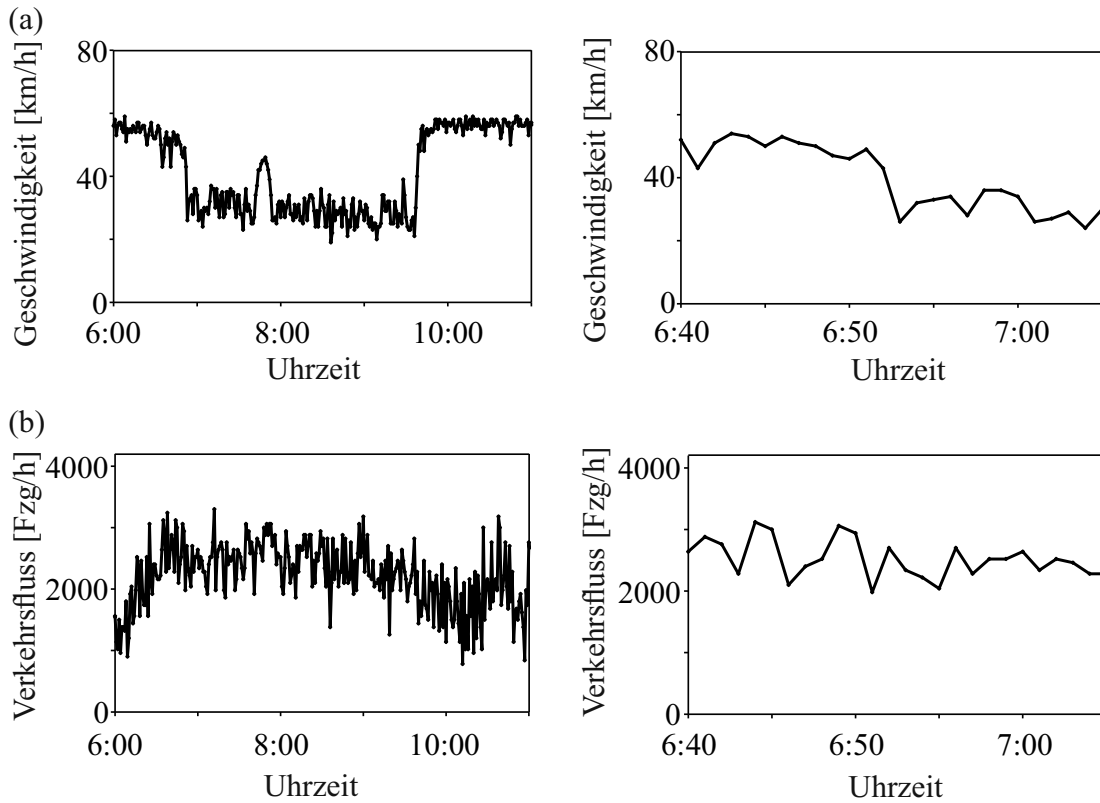


Abbildung 3.10: Empirischer Verkehrszusammenbruch auf dem Streckenabschnitt „Südring I“ (vgl. Abb. 3.1) am 13. November 2013: Zeitliche Entwicklung (a) der durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeit und (b) des Verkehrsflusses über das gesamte Zeitintervall übersättigten Verkehrs (links) und über den Teilabschnitt, in dem sich der Verkehrszusammenbruch ereignet (rechts). Minütlich gemittelte Daten des stationären Detektoren „DS I“ aus Abb. 3.1.

Im Folgenden diskutieren wir zwei Beispiele von Verkehrszusammenbrüchen auf dem dritten ausgewählten Streckenabschnitt „Südring II“ (Abbildungen 3.11 und 3.12). Im Gegensatz zu den übrigen beiden Streckenabschnitten erfolgt hier die Mittelung der Geschwindigkeit und die Aggregation des Verkehrsflusses über drei Fahrspuren. Wie bei

den Verkehrszusammenbrüchen an den beiden anderen Streckenabschnitten bricht die Geschwindigkeit in beiden Datenbeispielen vom „Südring II“ deutlich ein. Obwohl sich beim Verkehrszusammenbruch am 4. April 2013 der Abfall der Geschwindigkeit über einen längeren Zeitraum vollzieht als bei allen anderen Beispielen (15:57–16:07, vgl. Abb. 3.11 (a) rechts), liegt auch hier die Geschwindigkeit des übersättigten Verkehrs deutlich unterhalb der Geschwindigkeit des untersättigten Verkehrs. Dagegen lässt sich am 10. April 2013 und am 16. Januar 2014 über den Zeitraum zwischen Einbruch und Erholung der mittleren Geschwindigkeit keinerlei Rückgang des Verkehrsflusses beobachten.

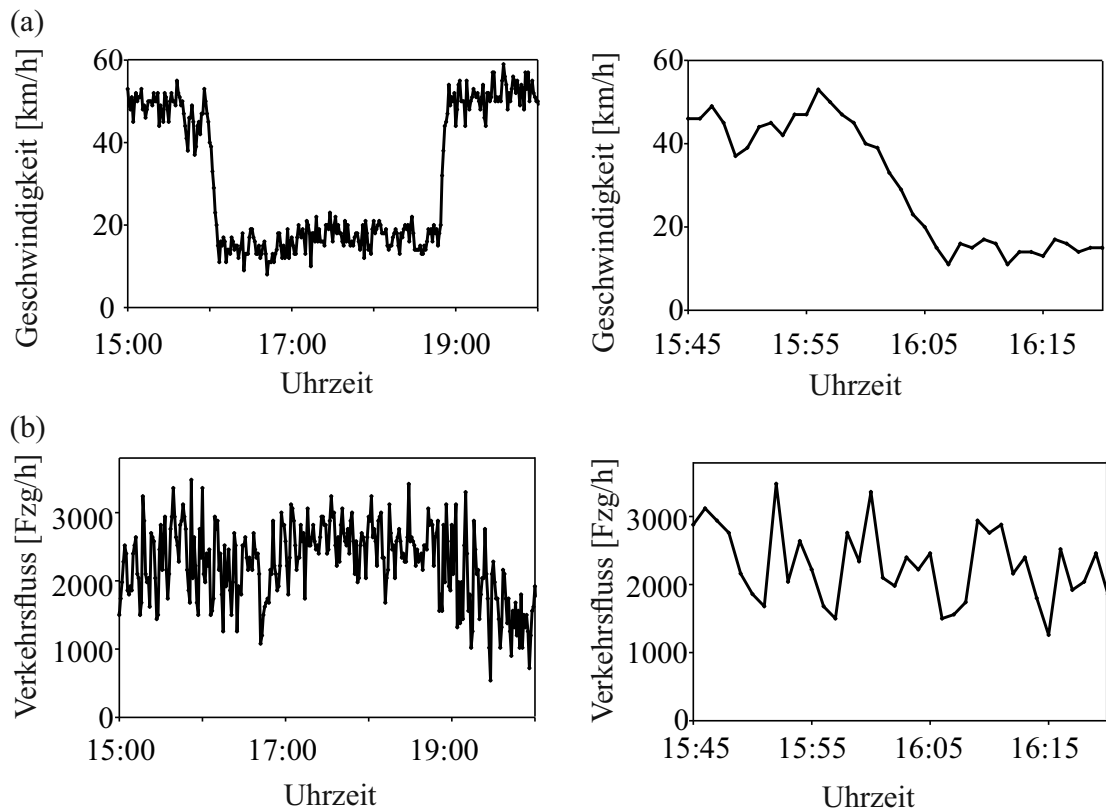


Abbildung 3.11: Empirischer Verkehrszusammenbruch auf dem Streckenabschnitt „Südring II“ (vgl. Abb. 3.1) am 10. April 2013: Zeitliche Entwicklung (a) der durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeit und (b) des Verkehrsflusses über das gesamte Zeitintervall übersättigten Verkehrs (links) und über den Teilabschnitt, in dem sich der Verkehrszusammenbruch ereignet (rechts). Minütlich gemittelte Daten des stationären Detektoren „DS II“ aus Abb. 3.1.

3.3 Empirische innerstädtische Verkehrszusammenbrüche

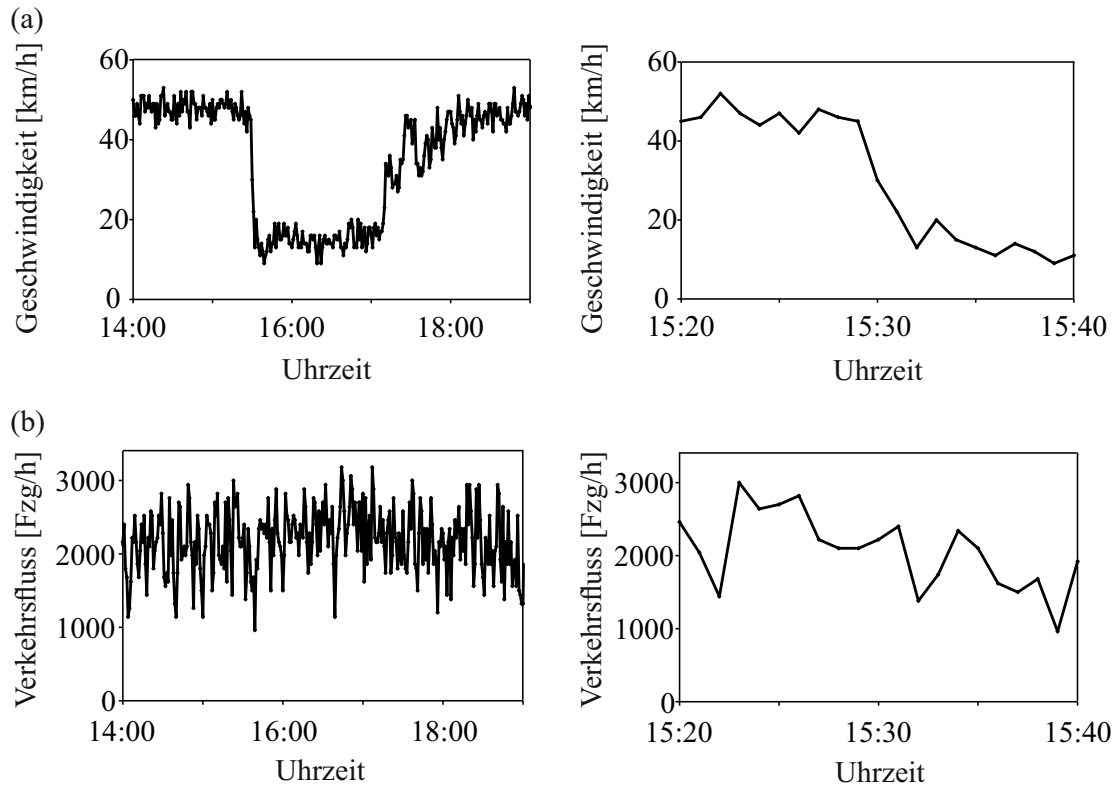


Abbildung 3.12: Empirischer Verkehrszusammenbruch auf dem Streckenabschnitt „Süd-ring II“ (vgl. Abb. 3.1) am 16. Januar 2014: Zeitliche Entwicklung (a) der durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeit und (b) des Verkehrsflusses über das gesamte Zeitintervall übersättigten Verkehrs (links) und über den Teilabschnitt, in dem sich der Verkehrszusammenbruch ereignet (rechts). Minütlich gemittelte Daten des stationären Detektoren „DS II“ aus Abb. 3.1.

Die in den Abbildungen 3.3 bis 3.12 gezeigten Beispiele innerstädtischer Verkehrszusammenbrüche unterscheiden sich quantitativ in Bezug auf mittlere Geschwindigkeiten, Verkehrsflüsse und Dauer, während der nach dem Zusammenbruch übersättigter Verkehr besteht. Alle Verkehrszusammenbrüche haben gemein, dass der Einbruch der Geschwindigkeit innerhalb weniger Minuten geschieht und anschließend der übersättigte Verkehr mindestens eine Stunde andauert.

Während die Geschwindigkeit in allen Beispielen stark einbricht, liegt für den Verkehrsfluss in denselben Zeiträumen kein vergleichbarer Abfall vor. In manchen Fällen ist der Verkehrsfluss im übersättigten Verkehr nach dem Verkehrsfluss sogar genauso groß wie oder größer als vor dem Verkehrszusammenbruch. Eine Übersicht der durchschnittlichen mittleren Geschwindigkeiten und Verkehrsflüsse im untersättigten Verkehr vor dem Zusammenbruch und im übersättigten Verkehr nach dem Zusammenbruch geben

3 Empirische Datengrundlage und empirische makroskopische Eigenschaften...

die Tabellen 3.1 und 3.2. Verglichen werden jeweils die Durchschnittswerte im Intervall $T^{(OS)}$ des übersättigten Verkehrs zwischen Zusammenbruch und Erholung des Verkehrs mit den Durchschnittswerten im Intervall $T^{(US)}$ des untersättigten Verkehrs vor dem Zusammenbruch. Die maximale Dauer von $T^{(US)}$ ist dabei eine Stunde. Falls eine Stunde vor dem Zusammenbruch noch ein deutlicher Anstieg des Verkehrsflusses, zum Beispiel bei steigendem morgendlichem Verkehrsaufkommen, zu beobachten ist, so wird nur der Zeitraum berücksichtigt, in dem der Verkehrsfluss nicht mehr ansteigt und bereits ein hohes Niveau erreicht hat (z.B. „Südring I“, 13. November, 6:35–6:51 Uhr, vgl. Abb. 3.10).

Aufgrund der Eigenschaft der in diesem Abschnitt diskutierten Verkehrszusammenbrüche, dass die Geschwindigkeit deutlich stärker abfällt als der Verkehrsfluss, bezeichnen wir diese Art von Verkehrszusammenbruch als *Einbruch der Geschwindigkeit* [47]. Ein Vergleich der Abbildungen 3.3 bis 3.12 mit dem in Abb. 2.9 gezeigten Verlauf von mittlerer Geschwindigkeit und Verkehrsfluss auf einer Schnellstraße legt deutliche qualitative Ähnlichkeiten von Einbrüchen der Geschwindigkeit auf innerstädtischen Straßen mit Lichtsignalanlagen und Verkehrszusammenbrüchen auf Schnellstraßen ohne Lichtsignalanlagen dar: Auch auf Schnellstraßen wird ein abrupter Abfall der Geschwindigkeit beobachtet, wogegen nach diesem Abfall der Geschwindigkeit der Verkehrsfluss weiterhin hohe Werte annehmen kann.

Tabelle 3.1: Vergleich der mittleren Geschwindigkeit $\langle \bar{v}^{(OS)} \rangle$ im übersättigten Verkehr (Durchschnitt über das Zeitintervall $T^{(OS)}$) mit der mittleren Geschwindigkeit $\langle \bar{v}^{(US)} \rangle$ im untersättigten Verkehr vor dem Verkehrszusammenbruch (Durchschnitt über das Zeitintervall $T^{(US)}$) für die in diesem Abschnitt diskutierten Verkehrszusammenbrüche aus den Abbildungen 3.3–3.12.

Abschnitt	Datum	$T^{(US)}$	$T^{(OS)}$	$\langle \bar{v}^{(US)} \rangle$	$\langle \bar{v}^{(OS)} \rangle$	$\frac{\langle \bar{v}^{(OS)} \rangle}{\langle \bar{v}^{(US)} \rangle}$
Völklinger Str.	21.12.2011	6:20–7:19	7:22–9:25	40 km/h	15 km/h	0,38
Völklinger Str.	17.5.2013	6:38–7:26	7:29–9:12	42 km/h	18 km/h	0,43
Völklinger Str.	9.9.2013	6:32–7:20	7:23–8:42	40 km/h	17 km/h	0,43
Völklinger Str.	29.10.2013	6:25–7:24	7:27–8:44	42 km/h	18 km/h	0,43
Völklinger Str.	19.12.2013	6:39–7:25	7:29–9:02	40 km/h	17 km/h	0,43
Südring I	12.4.2013	6:44–7:12	7:24–9:55	52 km/h	27 km/h	0,52
Südring I	12.4.2013	13:43–14:42	14:46–17:30	54 km/h	24 km/h	0,44
Südring I	13.11.2013	6:35–6:51	6:53–9:36	50 km/h	30 km/h	0,6
Südring II	10.4.2013	14:39–15:56	16:07–18:47	48 km/h	16 km/h	0,33
Südring II	16.1.2014	14:28–15:27	15:32–17:08	48 km/h	15 km/h	0,31

3.3 Empirische innerstädtische Verkehrszusammenbrüche

Tabelle 3.2: Vergleich des Verkehrsflusses $\langle J^{(OS)} \rangle$ im übersättigten Verkehr (Durchschnitt über das Zeitintervall $T^{(OS)}$) mit dem Verkehrsfluss $\langle J^{(US)} \rangle$ im untersättigten Verkehr vor dem Verkehrszusammenbruch (Durchschnitt über das Zeitintervall $T^{(US)}$) für die in diesem Abschnitt diskutierten Verkehrszusammenbrüche aus den Abbildungen 3.3–3.12. Die Zeitintervalle $T^{(US)}$ und $T^{(OS)}$ sind in Tabelle 3.1 zu finden. Durchschnittliche Verkehrsflüsse sind im Einklang mit der Auflösung der minütlichen Messwerte gerundet.

Abschnitt	Datum	$\langle J^{(US)} \rangle$	$\langle J^{(OS)} \rangle$	$\frac{\langle J^{(OS)} \rangle}{\langle J^{(US)} \rangle}$
Völklinger Str.	21.12.2011	1980 Fzg/h	1560 Fzg/h	0,79
Völklinger Str.	17.5.2013	2520 Fzg/h	2160 Fzg/h	0,86
Völklinger Str.	9.9.2013	2460 Fzg/h	2400 Fzg/h	0,98
Völklinger Str.	29.10.2013	2280 Fzg/h	2340 Fzg/h	1,03
Völklinger Str.	19.12.2013	2400 Fzg/h	2040 Fzg/h	0,85
Südring I	12.4.2013	3060 Fzg/h	2400 Fzg/h	0,78
Südring I	12.4.2013	2100 Fzg/h	2340 Fzg/h	1,11
Südring I	13.11.2013	2700 Fzg/h	2460 Fzg/h	0,91
Südring II	10.4.2013	2280 Fzg/h	2460 Fzg/h	1,08
Südring II	16.1.2014	2160 Fzg/h	2280 Fzg/h	1,06

3.3.2 Einbruch von Geschwindigkeit und Verkehrsfluss

In Abb. 3.13 ist ein innerstädtischer Verkehrszusammenbruch gezeigt, bei dem sich die zeitlichen Verläufe von mittlerer Geschwindigkeit und Verkehrsfluss qualitativ stark von den in Abschnitt 3.3.1 diskutierten Einbrüchen der Geschwindigkeit unterscheiden: Um 9:47 Uhr brechen *sowohl* mittlere Geschwindigkeit *als auch* Verkehrsfluss stark und abrupt ein. Die mittlere Geschwindigkeit liegt deutlich unterhalb der mittleren Geschwindigkeiten nach den Einbrüchen der Geschwindigkeit: Der Durchschnitt für den Zeitraum von 9:49 - 9:53 Uhr beträgt 6 km/h, was deutlich unterhalb der durchschnittlichen mittleren Geschwindigkeiten nach Einbruch der Geschwindigkeit auf demselben Streckenabschnitt (vgl. Tabelle 3.1) liegt. Für denselben Zeitraum liegt der Verkehrsfluss durchschnittlich bei 480 Fahrzeugen/h und nimmt um 9:50 Uhr den Tiefstwert von 240 Fahrzeugen/h an.

Den in Abb. 3.13 gezeigten Fall bezeichnen wir als *Einbruch von Geschwindigkeit und Verkehrsfluss* [47]. Während sich Einbrüche der Geschwindigkeit aufgrund hohen Verkehrsaufkommens ereignen, werden Einbrüche von Geschwindigkeit und Verkehrsfluss durch *starke Engstellen* verursacht, wie z.B. Unfälle, Baustellen, schlechtes Wetter oder Straßensperrungen. Für den 10.4.2013 bestätigten die Düsseldorfer Behörden einen Auffahrunfall auf der Völklinger Straße um 9:36 Uhr flussabwärts der Kreuzung mit der Fährstraße, woraufhin eine Fahrspur für wenige Minuten gesperrt wurde.

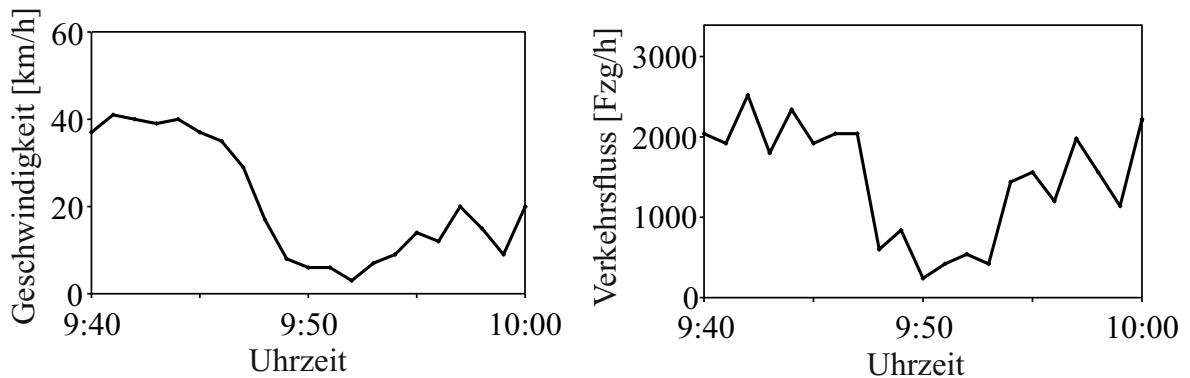


Abbildung 3.13: Einbruch von Geschwindigkeit und Fluss: Zeitliche Entwicklung der durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeit und des Verkehrsflusses. Daten des stationären Detektors „DV“ aus Abbildung 3.1 an der Völklinger Straße vom 10.4.2013.

Die Verwendung des Begriffs „Einbruch von Geschwindigkeit und Verkehrsfluss“ in dieser Arbeit ist zu unterscheiden von der Verwendung des Begriffs „Einbruch des Verkehrsflusses“ durch andere Autoren, zum Beispiel Dong und Mahmassani [52]. In Bezug auf Schnellstraßen meinen sie damit allgemein einen Rückgang des Verkehrsflusses bei gleichzeitigem Einbruch der Geschwindigkeit.

3.4 Mikroskopische Datenerfassung basierend auf Navigationsgeräten in Probe Vehicles

Das Messen von GPS-Positionen (*Global Positioning System*, vgl. [53]) durch Navigationsgeräte ermöglicht es, Trajektorien einzelner Fahrzeuge in Raum und Zeit zu rekonstruieren. Sie bilden somit eine wichtige Datenbasis für Verkehrsinformationssysteme [54] und zum Studium von Verkehrsbedingungen [55]. Schäfer *et al.* entwickelten ein Verkehrsinformationssystem auf der Grundlage von GPS-Daten von Taxiflotten [56]. Auch sind anonymisierte *Floating-Car-Daten* aus kommerziellen Navigationsgeräten bereits für die Rekonstruktion und Analyse der zeitlich-räumlichen Verkehrsdynamik auf Schnellstraßen verwendet worden [20]. Anonymisierte GPS-Daten aus Navigationssystemen (auch als *Personal Navigation Devices* oder „PNDs“ bezeichnet) in zufällig im Verkehrsfluss verteilten Fahrzeugen stehen seit mehreren Jahren zu allen Tageszeiten für vollständige Straßennetze zur Verfügung. In der vorliegenden Arbeit über übersättigten innerstädtischen Verkehr werden anonymisierte *Floating-Car-Daten* verwendet, die von der Firma TomTom für ausgewählte Tage im Zeitraum 2013–2014 zur Verfügung gestellt wurden. Auswahlkriterium für die Tage war, dass sich in den makroskopischen Daten stationärer Detektoren Verkehrszusammenbrüche finden ließen. Daten aus Einzelfahrzeugen bezeichnen wir auch als *mikroskopische Daten*.

3.4 Mikroskopische Datenerfassung basierend auf Navigationsgeräten in Probe Vehicles

Ein Navigationsgerät misst und speichert regelmäßig in festen zeitlichen Abständen seine GPS-Position. Zur weiteren Auswertung werden diese GPS-Daten an einen Server übertragen. Hierbei gibt es zwei Wege der Datenübertragung (vgl. Abb. 3.14): Ist das Navigationsgerät während der Fahrt mit dem Internet verbunden, also *online*, so wird alle zwei Minuten ein Datenpaket von GPS-Positionen mit den zugehörigen Zeitstempeln an den Server gesendet (Abb. 3.14 (a)). Der zeitliche Abstand Δt zwischen zwei aufeinanderfolgenden Datenpunkten beträgt dabei entweder 5 s oder 10 s.

Besteht während der Fahrt keine Internetverbindung, ist das Navigationsgerät also *offline*, so werden Zeitstempel und GPS-Positionen auf dem Gerät gespeichert. Eine nachträgliche Übertragung dieser historischen Daten auf den Server erfolgt, sobald der Nutzer sein Navigationsgerät an einen PC mit Internetverbindung anschließt, um Karten oder die Software auf dem Gerät zu aktualisieren (Abb. 3.14 (b)). Bei dieser Datenübertragung werden GPS-Positionen mit sekundlichem Zeitabstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Datenpunkten übermittelt, also $\Delta t = 1$ s.

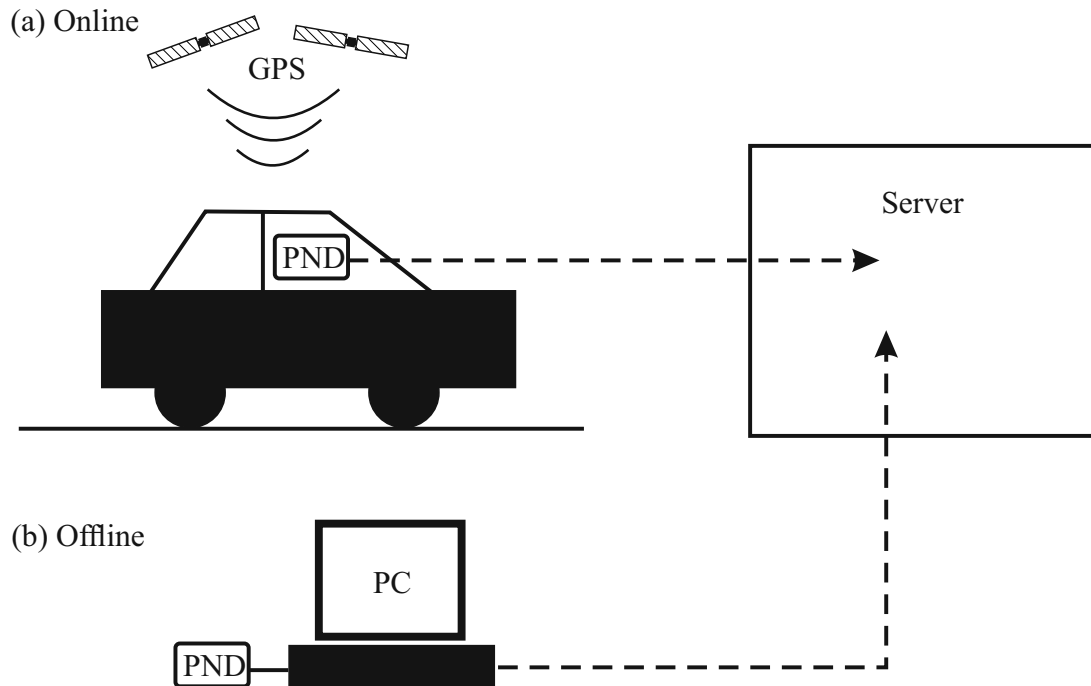


Abbildung 3.14: Wege der Übertragung anonymisierter GPS-Positionen aus Navigationssystemen („PNDs“) an den Datenserver: (a) Übertragung von „Online“-Daten von PNDs mit Internetverbindung. (b) Übertragung historischer „Offline“-Daten über eine Verbindung des PND mit einem PC.

3 Empirische Datengrundlage und empirische makroskopische Eigenschaften...

Die räumliche Genauigkeit der auf dem Server gespeicherten GPS-Positionen ist durch die Datenkompression begrenzt, welche zur Übertragung von Daten zwischen Navigationsgeräten und Server vorgenommen wird: Die GPS-Positionen werden auf die Genauigkeit $\Delta x = 1$ m gerundet. Außerdem gibt es, bedingt durch die Programmierung der GPS-Chips in den Geräten, einen Fangradius: Ein Navigationsgerät zeichnet so lange dieselbe alte Position auf, bis der Abstand der neuen Position zur alten Position größer ist als der Fangradius. Der Fangradius liegt in der Größenordnung von 10 Metern und variiert zwischen verschiedenen Geräten.

Auf dem Server werden die GPS-Positionen von den Navigationsgeräten mit einer digitalen Straßenkarte abgeglichen, in der die Straßen bzw. Teilabschnitte der Straßen durch Kanten eines Straßennetzgraphen repräsentiert werden. Einer gemessenen GPS-Position wird die Kante des Straßennetzes und die Position relativ zum Beginn der Kante zugeordnet („Map-Matching“, vgl. [57]). Aus den hieraus erhaltenen Positionen $x_n = x_0, \dots, x_N$ eines Fahrzeugs auf einem Streckenabschnitt und den dazugehörigen Zeitstempeln $t_n = t_0, \dots, t_N$ kann die Fahrzeuggeschwindigkeit $v_n = v_1, \dots, v_N$ als Zeitmittel zwischen zwei GPS-Messungen berechnet werden gemäß der Formel

$$v_n = \frac{x_n - x_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}. \quad (3.2)$$

Die mittlere Geschwindigkeit V entlang einer Fahrzeugtrajektorie ergibt sich gemäß der Gleichung

$$V = \frac{1}{t_N - t_0} \int_{t_0}^{t_N} v \, dt = \frac{x_N - x_0}{t_N - t_0}. \quad (3.3)$$

Ein Beispiel für einen aus GPS-Positionen abgeleiteten zeitlichen Geschwindigkeitsverlauf entlang einer Fahrzeugtrajektorie ist in Abb. 3.15 zu sehen: Dieser Geschwindigkeitsverlauf ist in den zeitliche Auflösungen $\Delta t = 1$ s (Abb. 3.15 (a)) und $\Delta t = 5$ s (Abb. 3.15 (b)) abgebildet. Man erkennt, wie sich die durch Datenkompression und den Fangradius bedingten Messfehler auswirken. Der Geschwindigkeitsverlauf ist für $\Delta t = 1$ s mit einem Rauschen belegt, das durch die Ungenauigkeit der berechneten Geschwindigkeit aus GPS-Positionen bedingt ist. Die Auswirkung des Fangradius ist in Abb. 3.15 (a) im Zeitraum zwischen 7:31:30 und 7:32:00 Uhr zu erkennen: nachdem die berechnete Geschwindigkeit einige Sekunden den Wert null hat, springt sie für eine Sekunde auf über 30 km/h und in der nächsten Sekunde zurück auf null. Für $\Delta t = 5$ s hingegen werden die durch Kompression und Fangradius bedingten Messfehler herausgemittelt, und es lassen sich glatte Geschwindigkeitsverläufe aus den GPS-Daten ableiten.

Aufgrund der genannten Messfehler, die sich am stärksten bei der Berechnung von Geschwindigkeitsverläufen aus GPS-Daten mit $\Delta t = 1$ s zeigen, werden bei der Untersuchung mikroskopischer Eigenschaften des übersättigten Verkehrs in Kapitel 4 Geschwindigkeitsverläufe mit $\Delta t = 5$ s gezeigt. Gegebenenfalls werden hierbei auch sekundliche Daten auf die zeitliche Auflösung von $\Delta t = 5$ s reduziert.

3.4 Mikroskopische Datenerfassung basierend auf Navigationsgeräten in Probe Vehicles

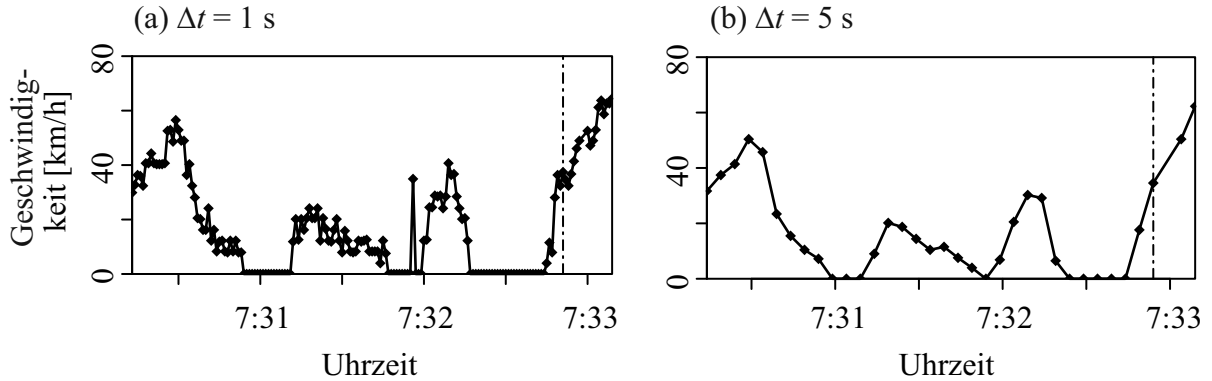


Abbildung 3.15: Aus anonymisierten empirischen GPS-Daten abgeleitete Geschwindigkeiten entlang derselben Fahrzeugtrajektorie mit unterschiedlichen Zeitintervallen Δt zwischen GPS-Messungen: (a) $\Delta t = 1$ s, (b) $\Delta t = 5$ s. Die strichpunktierten Linien markieren den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA.

Wie in Kapitel 5 ausführlich diskutiert werden wird, hängt der Kraftstoffverbrauch bzw. die Energieumwandlung von Fahrzeugen von ihrer Geschwindigkeit und Beschleunigung ab. Die Fahrzeugbeschleunigung kann jedoch nicht aus GPS-Daten von Navigationsgeräten bestimmt werden: Im Fall $\Delta t = 1$ s kann infolge des Fangradius ein Fehler von 10 m/s^2 auftreten. Somit ist die Größenordnung des Fehlers oberhalb der Skala real gefahrener Beschleunigungen, die im Bereich zwischen -6 und 6 m/s^2 liegen.

Aus GPS-Daten mit $\Delta t = 5$ s kann die Beschleunigung nicht bestimmt werden, weil sich die reale Beschleunigung eines Fahrzeugs in einer Skala unterhalb von 5 Sekunden stark ändern kann. In der vorliegenden Arbeit wird daher die Energieeffizienz bzw. der Kraftstoffverbrauch nicht in Abhängigkeit der Fahrzeugbeschleunigung ausgedrückt. Stattdessen wird die *kumulierte Beschleunigung pro Streckenlänge* als Kenngröße für Energieeffizienz bzw. Kraftstoffverbrauch verwendet, die aus GPS-Daten mit $\Delta t = 5$ s berechnet werden kann (vgl. Kapitel 5).

In Abb. 3.15 und in allen weiteren in der vorliegenden Arbeit gezeigten Geschwindigkeitsverläufen ist das Überfahren der Lichtsignalanlage durch eine vertikale strichpunktierte Linie gekennzeichnet. Sie ist durch den zeitlich ersten Wert nach dem Passieren der Lichtsignalanlage gelegt. Mit dem Passieren der Lichtsignalanlage verlässt das Fahrzeug jeweils den betrachteten Streckenabschnitt. Deshalb beziehen sich die Diskussion empirischer Verkehrsmuster in Kapitel 4 und die Berechnung makroskopischer Kennzahlen für die Energieeffizienz in Kapitel 5 stets auf den Bildausschnitt zwischen dem linken Bildrand und der strichpunktierten Linie.

4 Empirische mikroskopische Eigenschaften des übersättigten innerstädtischen Verkehrs

Inhalt dieses Kapitels ist eine Untersuchung der empirischen mikroskopischen Eigenschaften und Verkehrsmuster des übersättigten innerstädtischen Verkehrs. Hauptsächlich stützt sich diese Untersuchung auf anonymisierte GPS-Daten von Navigationsgeräten in einzelnen Fahrzeugen (vgl. Abschnitt 3.4). Zusätzlich zu diesen mikroskopischen Daten werden Detektordaten der makroskopischen Messgrößen mittlere Geschwindigkeit und Verkehrsfluss betrachtet. Größtenteils wird übersättigter Verkehr nach Einbruch der Geschwindigkeit untersucht (vgl. Abschnitt 3.3.1). Zudem wird die empirische *Mega-Queue*, die mit dem Einbruch von Geschwindigkeit und Verkehrsfluss (Abschnitt 3.3.2) in Verbindung steht, in einem eigenen Abschnitt thematisiert.

Anhand erster Beispiele anonymisierter empirischer GPS-Fahrzeugtrajektorien von einem innerstädtischen Streckenabschnitt haben Kerner *et al.* die Existenz von Synchronisiertem Verkehr im übersättigten innerstädtischen Verkehr empirisch belegt [47]. In diesem Kapitel werden die empirischen mikroskopischen Eigenschaften des übersättigten Verkehrs umfassend untersucht. Von drei verschiedenen Streckenabschnitten (vgl. Abschnitt 3.1) werden Daten einiger Tage der Jahre 2011, 2013 und 2014 betrachtet.

Zunächst werden Moving Queues und Synchronisierter Verkehr als grundlegende Verkehrsmuster des übersättigten Verkehrs nach Einbruch der Geschwindigkeit anhand empirischer Trajektorien einzelner Fahrzeuge diskutiert. Anschließend werden die verschiedenartigen Kombinationen und Mischformen aufgeführt, in denen Moving Queues und Synchronisierter Verkehr in Zeit und Raum auftreten. Im Anschluss an die Untersuchung des übersättigten Verkehrs nach Einbruch der Geschwindigkeit wird mit der Mega-Queue ein empirisches Verkehrsmuster diskutiert, das beobachtet wird, wenn neben der eingebrochenen Geschwindigkeit auch deutlich abgefallene Verkehrsflüsse gemessen werden.

4.1 Empirische mikroskopische Phänomene nach Einbruch der Geschwindigkeit

4.1.1 Klassische Moving Queues

Wir beginnen unsere Untersuchung empirischer mikroskopischer Verkehrsmuster mit einer Diskussion klassischer *Folgen von Moving Queues* (MQ). Die aus anonymisierten GPS-Positionsdaten ermittelte Trajektorie eines einzelnen Fahrzeugs, das eine Folge von Moving Queues auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1) nach einem Einbruch der Geschwindigkeit durchfährt, ist in Abb. 4.1 gezeigt: Zusätzlich zum Stillstand unmittelbar stromabwärts der Lichtsignalanlage hält das Fahrzeug zuvor bereits zwei weitere Male in Warteschlangen an. Über den betrachteten gestauten Streckenabschnitt gibt es eine regelmäßige Abfolge von Stillständen und kurzen gefahrenen Strecken zwischen den Orten dieser Stillstände. Nach jedem Stillstand beschleunigt das Fahrzeug und verlangsamt anschließend wieder, um in der nächsten Warteschlange anzuhalten. Im Weg-Zeit-Diagramm auf der linken Seite der Abbildung sind die Anhaltevorgänge in Warteschlangen klar als ebene Teilstücke der Fahrzeugtrajektorie erkennbar. Auch in den Geschwindigkeitsverläufen ist die Abfolge von Anhaltevorgängen und Fortbewegung von einer Moving Queue zur nächsten deutlich zu erkennen.

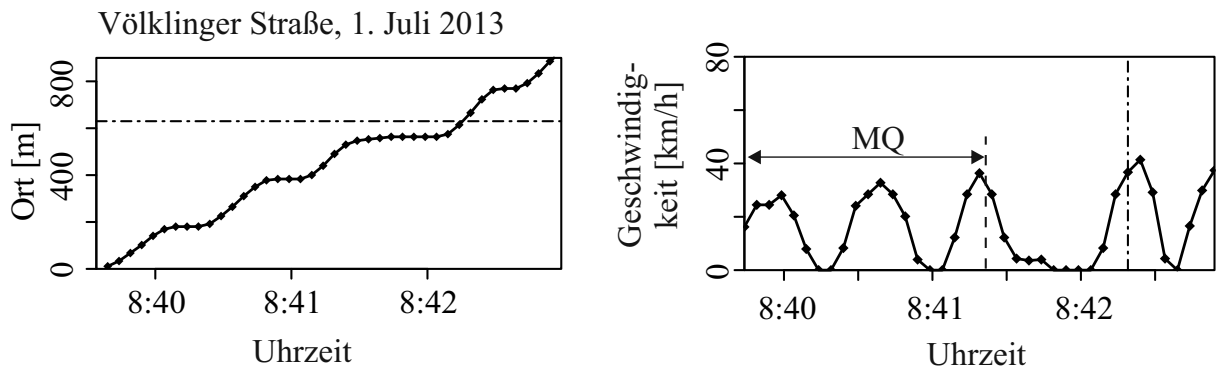


Abbildung 4.1: Empirische Folgen von Moving Queues (MQ): Trajektorie eines einzelnen Fahrzeugs (links) und mikroskopische Geschwindigkeit (rechts) entlang dieser Trajektorie aus anonymisierten empirischen GPS-Daten vom Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

Im Geschwindigkeitsverlauf auf der rechten Seite der Abbildung 4.1 (wie auch aller folgenden Abbildungen dieses Abschnittes) ist das Durchfahren der Folgen von Moving Queues durch gestrichelte Linien und Doppelpfeile markiert. Hierbei ist das letzte Anhalten vor Verlassen des betrachteten Streckenabschnittes ausgenommen. Der Grund hierfür

4.1 Empirische mikroskopische Phänomene nach Einbruch der Geschwindigkeit

ist, dass Fahrzeuge im übersättigten Verkehr unabhängig vom Verkehrsmuster an der Lichtsignalanlage anhalten. Die Markierung durch Linien und Pfeile soll Folgen von Moving Queues von anderen Verkehrsmustern abgrenzen.

Zwei weitere Beispiele von Fahrzeugtrajektorien in klassischen Folgen von Moving Queues sind in Abb. 4.2 gezeigt. Wie beim vorigen Beispiel sind die zugrundeliegenden anonymisierten GPS-Daten auch in diesen Fällen auf der „Völklinger Straße“ gemessen worden. Auch hier sind die Anhaltetvorgänge deutlich in den Weg-Zeit-Diagrammen sowie den zugehörigen zeitlichen Geschwindigkeitsverläufen erkennbar. Im Vergleich zum vorigen Beispiel aus Abb. 4.1 halten die Fahrzeuge in Abb. 4.2 jeweils einmal mehr, bevor sie die Lichtsignalanlage passieren und damit den betrachteten Streckenabschnitt verlassen.

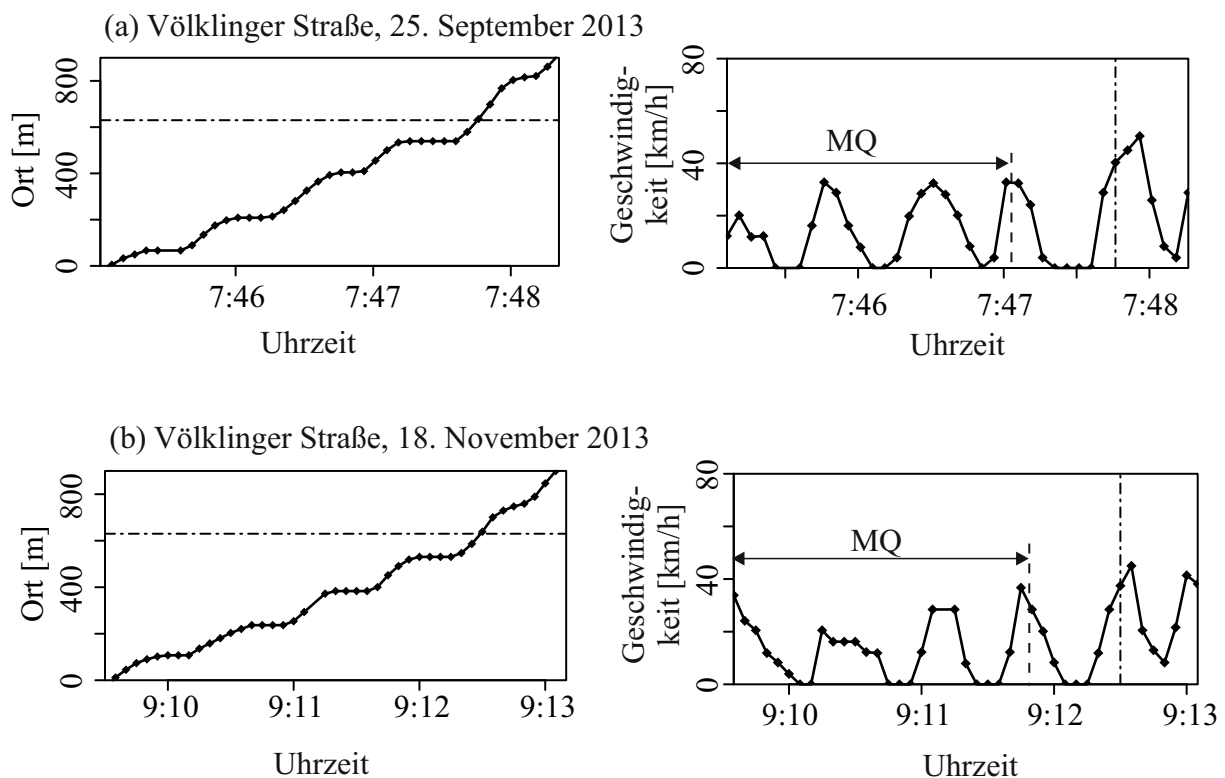


Abbildung 4.2: Empirische Folgen von Moving Queues (MQ): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten vom Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

Stammten die bisher betrachteten Beispiele von der „Völklinger Straße“, so lassen sich auch auf anderen Streckenabschnitten empirische Folgen von Moving Queues beobachten. In Abb. 4.3 sind Beispiele von den Streckenabschnitten „Südring I“ (Teilabbildung (a)) und

Südring II (Teilabbildung (b)) gezeigt. Auch in diesen beiden Fällen erkennt man deutlich den typischen Verlauf mit mehreren Anhaltetvorgängen auf den jeweiligen betrachteten Streckenabschnitten in den Weg-Zeit-Diagrammen und in den zeitlichen Geschwindigkeitsverläufen. Vor dem Halt direkt vor der Lichtsignalanlage gibt es während des Zeitintervalls, das mit „MQ“ gekennzeichnet ist, vier bzw. drei weitere Anhaltetvorgänge. Zwischen den Stillständen in den Moving Queues erreichen die Fahrzeuge Maximalgeschwindigkeiten zwischen 15 km/h und 30 km/h.

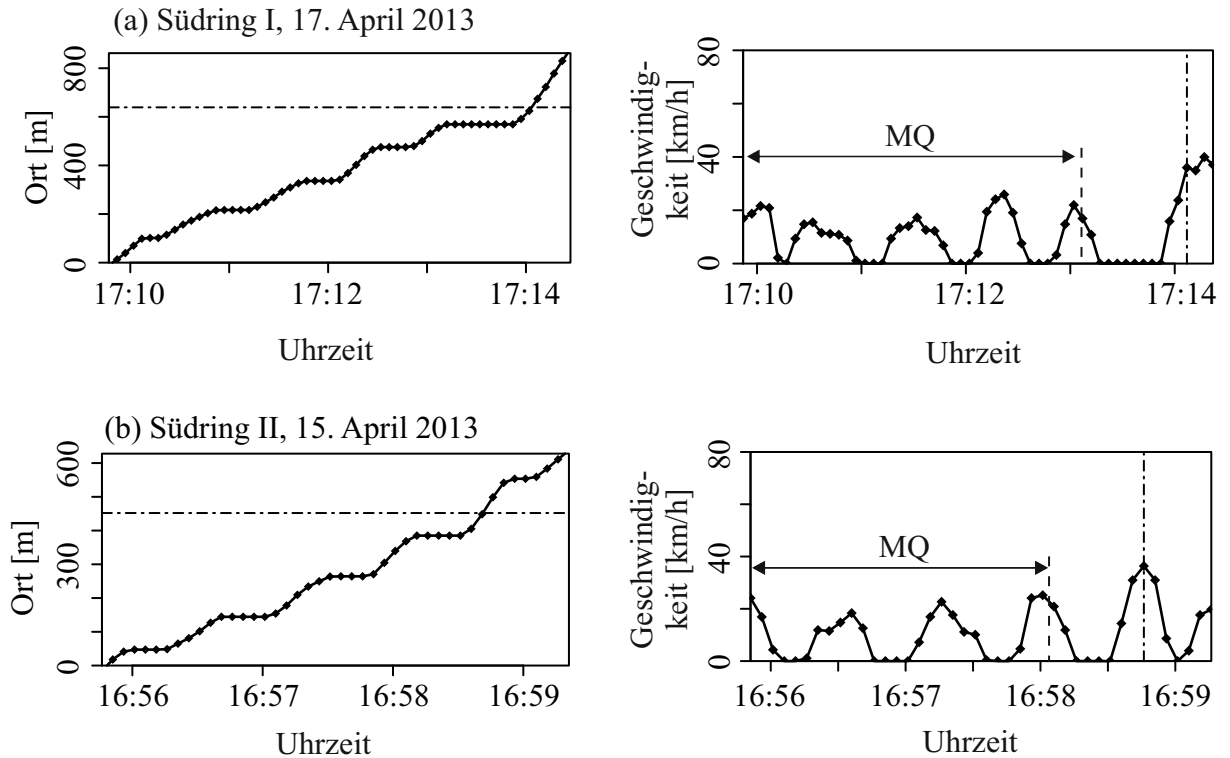


Abbildung 4.3: Empirische Folgen von Moving Queues (MQ): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten von den Streckenabschnitten „Südring I“ und „Südring II“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

In Abb. 4.4 sind zwei weitere Beispiele für Folgen von Moving Queues gezeigt, die beide auf dem „Südring II“ am selben Tag nach demselben Einbruch der Geschwindigkeit im übersättigten Verkehr gemessen wurden. Es handelt sich um den in Abschnitt 3.3.1 diskutierten Verkehrszusammenbruch aus Abb. 3.11. Beide Trajektorien weisen das für Moving Queues typische Abwechseln von Stillständen und Fortbewegung zwischen den Stillständen auf, allerdings in unterschiedlichen Ausprägungen. So hält in Teilabbildung

4.1 Empirische mikroskopische Phänomene nach Einbruch der Geschwindigkeit

(a) das Fahrzeug ein Mal öfter in Moving Queues an als in Teilabbildung (b) und benötigt auch deutlich mehr Zeit, um den gesamten Streckenabschnitt zu durchfahren. Diese Beispiele zeigen, dass sich nach einem Verkehrszusammenbruch innerhalb einer Stunde der Verkehrszustand im übersättigten Verkehr deutlich ändern kann.

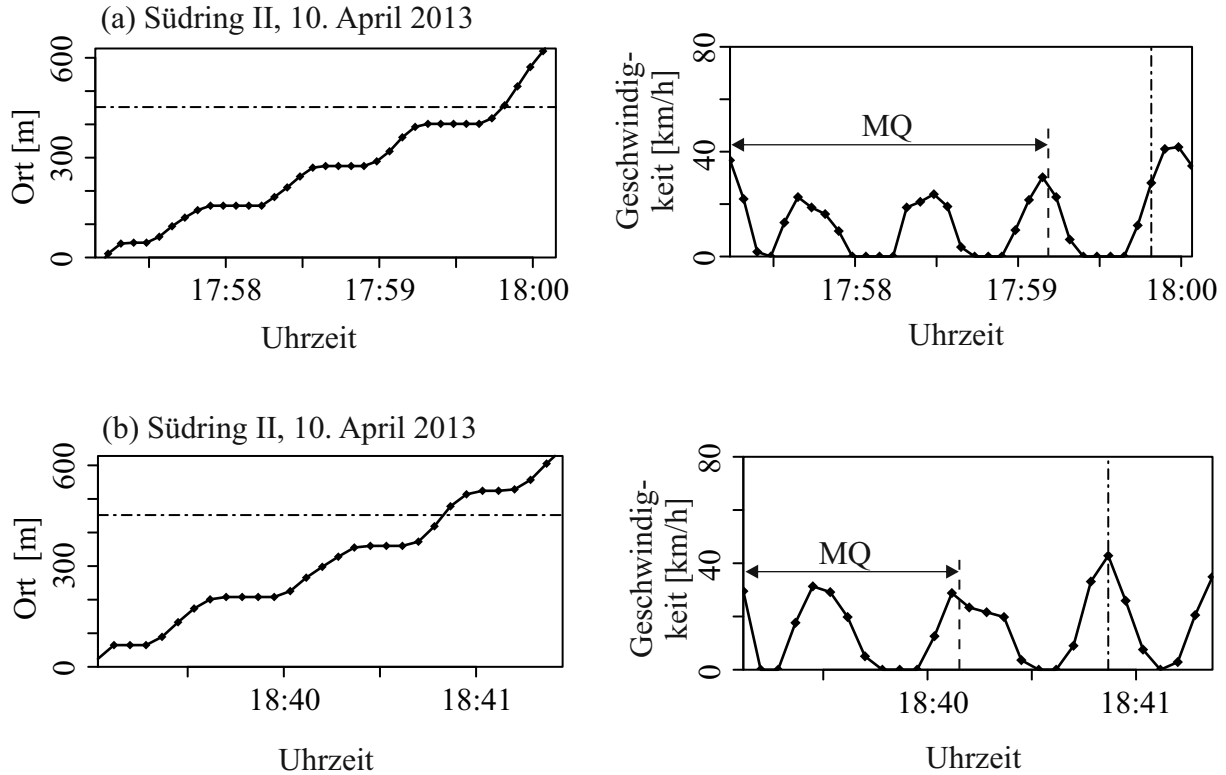


Abbildung 4.4: Empirische Folgen von Moving Queues (MQ): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten vom Streckenabschnitt „Südring II“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktuierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

4.1.2 Strukturen des Synchronisierten Verkehrs

In diesem Abschnitt diskutieren wir ein weiteres typisches empirisches Verkehrsmuster, das sich durch anonymisierte GPS-Daten von den betrachteten Streckenabschnitten belegen lässt: Strukturen des Synchronisierten Verkehrs („SP“, *synchronized flow pattern*). Zwei erste Beispiele für Trajektorien von Einzelfahrzeugen, die auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1) Strukturen des Synchronisierten Verkehrs durchfahren, sind in Abb. 4.5 gezeigt. Deutliche qualitative Unterschiede zu den empirischen Moving

4 Empirische mikroskopische Eigenschaften des übersättigten innerstädtischen Verkehrs

Queues aus Abschnitt 4.1.1 sind erkennbar: Anstatt mehrfach in regelmäßiger Abfolge zum Stillstand zu kommen, bewegen sich die Fahrzeuge mit niedrigen Geschwindigkeiten, die im Mittel deutlich unter der Freiflussgeschwindigkeit des betreffenden Streckenabschnittes liegen, fort, und kommen erst nach Verlassen des Synchronisierten Verkehrs in der direkten stromaufwärtigen Umgebung der Lichtsignalanlage zum Stillstand.

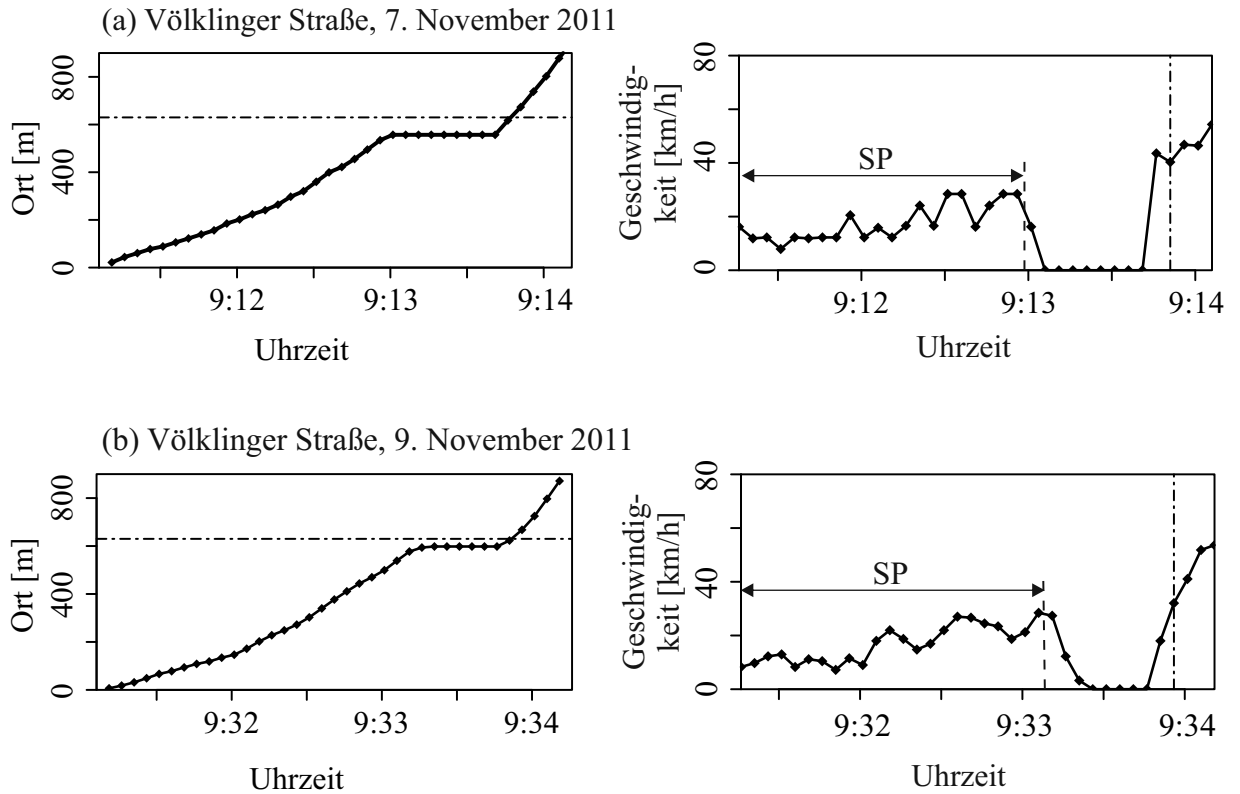


Abbildung 4.5: Empirische Strukturen des Synchronisierten Verkehrs (SP): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten vom Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunkteten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

Bis auf den Stillstand unmittelbar stromaufwärts der Lichtsignalanlage sind in den Weg-Zeit-Diagrammen auf der linken Seite von Abb. 4.5 keine ebenen Teilstücke zu erkennen. Auch in den Geschwindigkeitsverläufen, in denen (wie bei allen folgenden Beispielen in diesem Abschnitt) die Fahrt durch den Synchronisierten Verkehr als „SP“ gekennzeichnet ist, erkennt man, wie sich die Fahrzeuge mit Geschwindigkeiten des Synchronisierten Verkehrs fortbewegen. Beide Beispiele zeigen dabei große qualitative Ähnlichkeiten im Verlauf der Geschwindigkeit: in der ersten Minute der Fahrt durch den Synchronisierten

4.1 Empirische mikroskopische Phänomene nach Einbruch der Geschwindigkeit

Verkehr bewegen sich die Fahrzeuge mit sehr geringer Geschwindigkeit und werden zur Mitte des Streckenabschnittes hin schneller. Auch die Reisezeit auf dem betrachteten Streckenabschnitt ist in beiden Beispielen etwa gleich lang.

Zwei weitere Beispiele für empirische Strukturen des Synchronisierten Verkehrs auf der „Völklinger Straße aus dem Jahr 2011 sind in Abb. 4.6 gezeigt. Während der Fahrt durch den Synchronisierten Verkehr unterscheiden sich die beiden Geschwindigkeitsverläufe deutlich voneinander. Im Beispiel aus Teilabbildung (a) ist die Fahrzeuggeschwindigkeit zunächst niedrig, nimmt zur Streckenmitte hin zu, fällt dann wieder leicht ab und nimmt kurz vor dem Abbremsen an der Lichtsignalanlage einen Höchstwert von über 40 km/h an. Auch der Geschwindigkeitsverlauf aus Teilabbildung (b) weist mehrere Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge auf, die Geschwindigkeitsspanne ist hier aber deutlich kleiner.

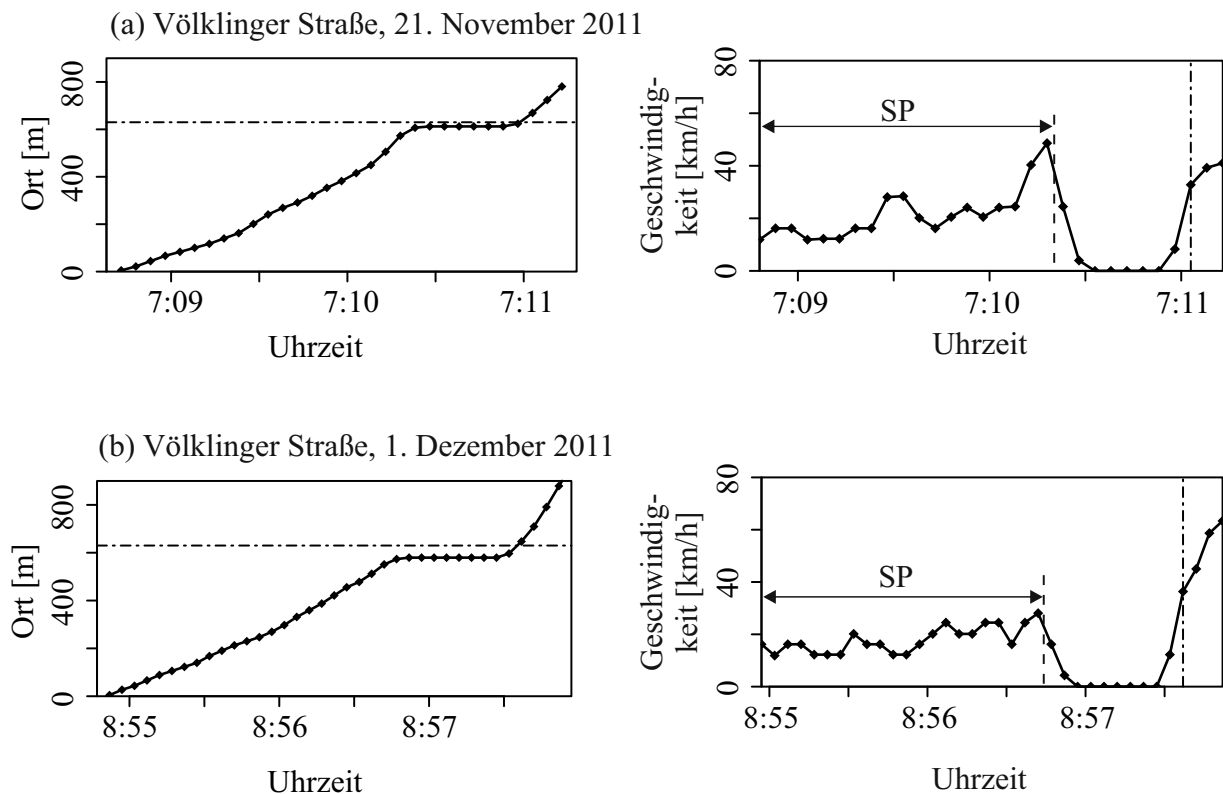


Abbildung 4.6: Empirische Strukturen des Synchronisierten Verkehrs (SP): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten vom Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

4 Empirische mikroskopische Eigenschaften des übersättigten innerstädtischen Verkehrs

Von den in Abb. 4.7 gezeigten Fahrzeugtrajektorien ist die eine im Jahr 2011 und die andere im Jahr 2013 auf der „Völklinger Straße“ gemessen worden. Auch hier handelt es sich um Strukturen des Synchronisierten Verkehrs. Die beiden Beispiele weisen Unterschiede im Geschwindigkeitsverlauf bei der Fahrt durch den Synchronisierten Verkehr auf. Im Beispiel aus Teilabbildung (a) variiert die Geschwindigkeit stark in der stromaufwärtigen Streckenhälfte und nimmt dort zunächst ein Minimum und 15 Sekunden später ein Maximum an. Im Beispiel aus Teilabbildung (b) lässt sich beobachten, wie die Geschwindigkeit des Fahrzeugs während der Fahrt durch den Synchronisierten Verkehr von 9:00 Uhr bis 9:01 Uhr weitgehend zunimmt.

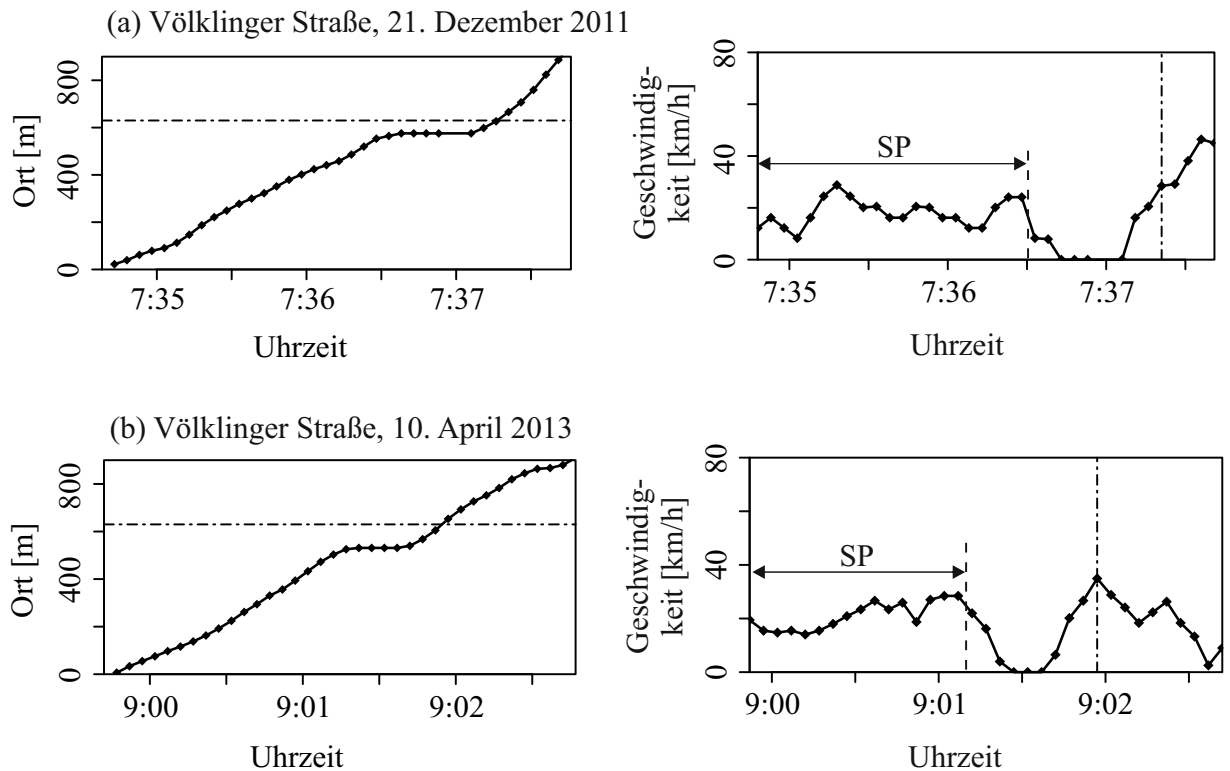


Abbildung 4.7: Empirische Strukturen des Synchronisierten Verkehrs (SP): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten vom Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunkteten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

4.1 Empirische mikroskopische Phänomene nach Einbruch der Geschwindigkeit

In Abb. 4.8 sind zwei Fahrten durch Synchronisierten Verkehr gezeigt, bei denen sich häufige und starke Geschwindigkeitsänderungen in den auf der rechten Seite der Abbildung gezeigten Geschwindigkeitsverläufen erkennen lassen. In beiden Beispielen ist während der gesamten Fahrt durch den Synchronisierten Verkehr zu beobachten, wie sich Zunahme und Abnahme der Geschwindigkeit innerhalb kurzer Zeit abwechseln. Im Beispiel aus Teilabbildung (a) gibt es kurz vor dem Verzögern an der Lichtsignalanlage eine deutliche Beschleunigung auf ein Geschwindigkeitsmaximum von über 40 km/h, wie es schon im Beispiel aus Abb. 4.6 (a) vorliegt.

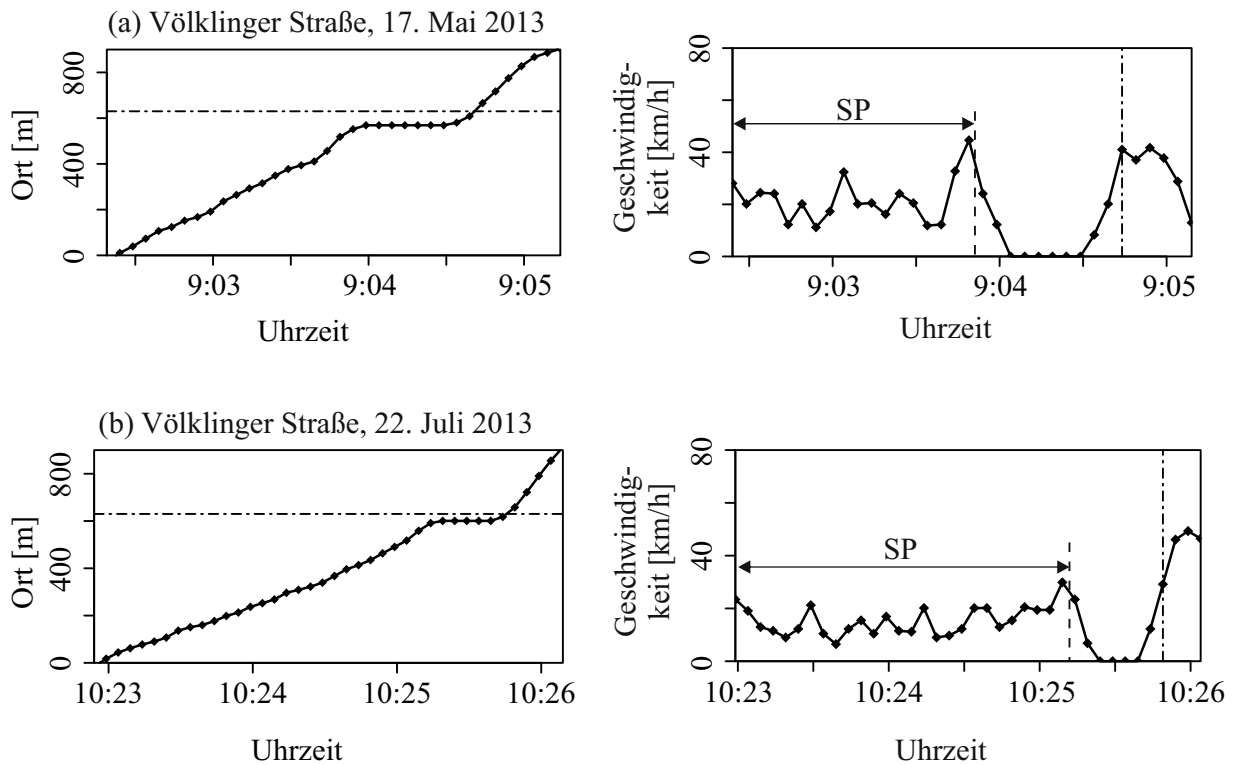


Abbildung 4.8: Empirische Strukturen des Synchronisierten Verkehrs (SP): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten vom Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

4 Empirische mikroskopische Eigenschaften des übersättigten innerstädtischen Verkehrs

Auch in Abb. 4.9 sind zwei Beispiele für Fahrten durch Synchronisierten Verkehr gezeigt, bei denen sich die Geschwindigkeitsverläufe untereinander unterscheiden. In Teilabbildung (a) ist sowohl im Weg-Zeit-Diagramm als auch im zeitlichen Geschwindigkeitsverlauf klar erkennbar, wie die Fahrzeuggeschwindigkeit um 8:11 Uhr geringer wird. Außer dieser deutlichen Verminderung ändert das Fahrzeug nur geringfügig seine Geschwindigkeit. Dies gilt sowohl für den Zeitraum vor als auch für den Zeitraum nach der genannten Geschwindigkeitsänderung. Im Gegensatz zu diesem relativ ebenen Geschwindigkeitsverlauf weist die Trajektorie aus Teilabbildung (b) wieder einen ähnlichen Verlauf wie das Beispiel aus Abb. 4.8 (a) auf: Während der Fahrt durch den Synchronisierten Verkehr gibt es häufige und starke Geschwindigkeitsänderungen, und kurz vor dem Verzögern an der Lichtsignalanlage nimmt die Geschwindigkeit ein deutlich ausgeprägtes Maximum an.

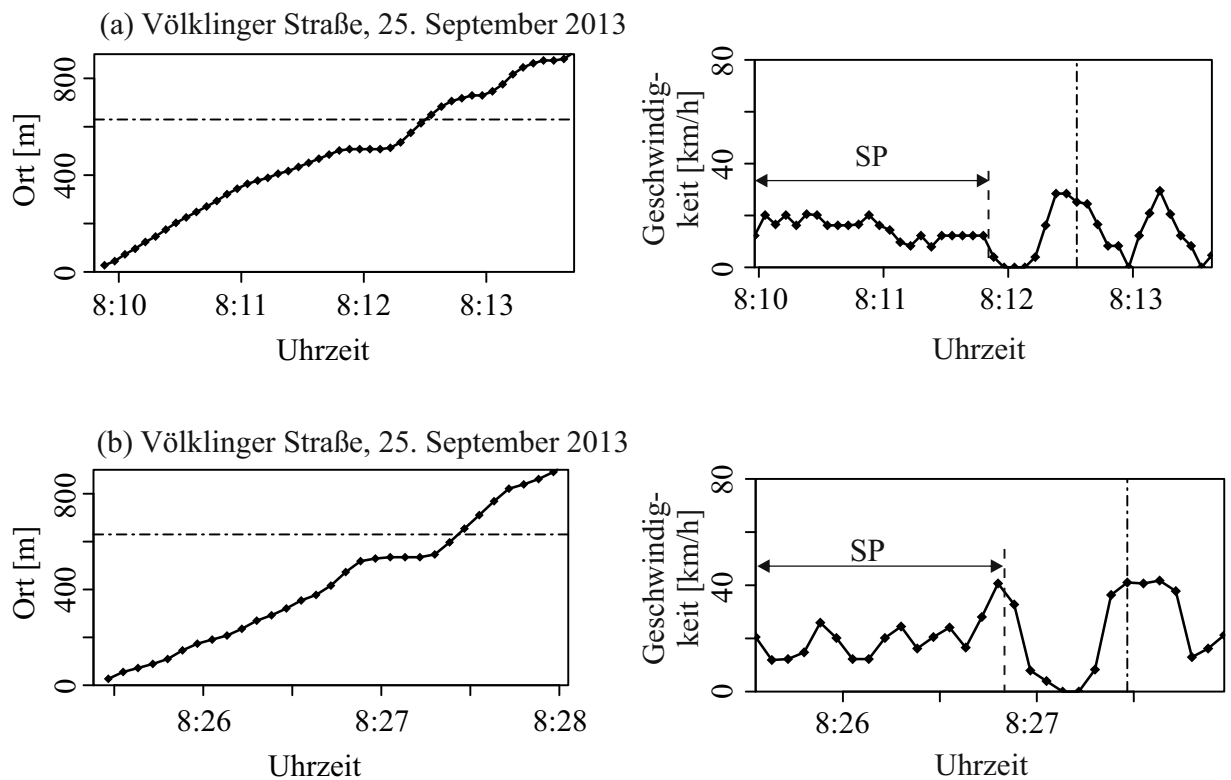


Abbildung 4.9: Empirische Strukturen des Synchronisierten Verkehrs (SP): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten vom Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktuierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

4.1 Empirische mikroskopische Phänomene nach Einbruch der Geschwindigkeit

Zwei weitere Beispiele für Strukturen des Synchronisierten Verkehrs auf der Völklinger Straße sind in Abb. 4.10 gezeigt. In beiden Fällen gibt es entlang der Fahrzeugtrajektorien häufige Geschwindigkeitsänderungen. Die Beispiele unterscheiden sich bezüglich der Geschwindigkeitsspanne, die für Teilabbildung (a) deutlich geringer ist. In Teilabbildung (b) zeigt sich, ähnlich wie in den Beispielen aus den Abbildungen 4.6 (a), 4.8 (a) und 4.9 (b), ein deutliches Geschwindigkeitsmaximum vor dem Verzögern an der Lichtsignalanlage.

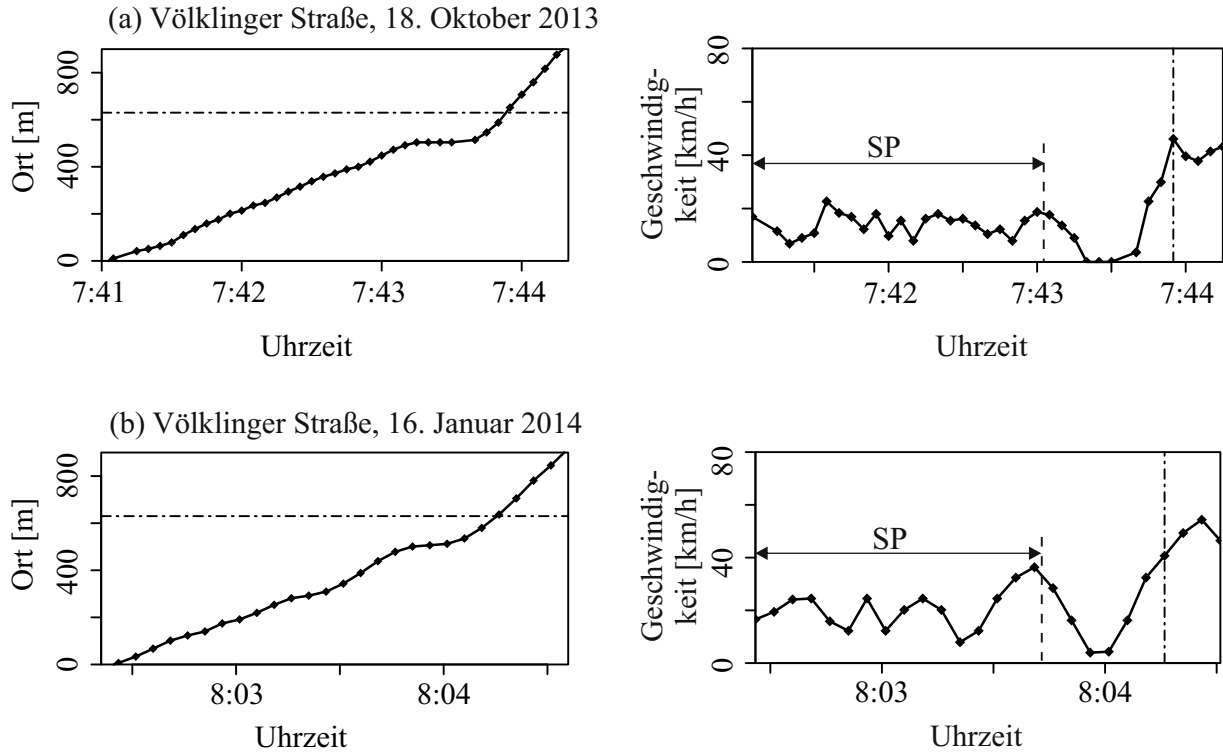


Abbildung 4.10: Empirische Strukturen des Synchronisierten Verkehrs (SP): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten vom Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

Bisher haben wir in diesem Abschnitt Beispiele für Strukturen des Synchronisierten Verkehrs vom Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ diskutiert (vgl. Abb. 3.1). In Abb. 4.11 sind zwei Fahrzeugtrajektorien vom Streckenabschnitt „Südring I“ gezeigt, die an verschiedenen Tagen im April 2013 gemessen wurden. In den Geschwindigkeitsverläufen sieht man auch hier, wie sich die Fahrzeuge mit typischen Geschwindigkeiten des Synchronisierten Verkehrs bewegen, ohne anzuhalten. Bei der Fahrt durch den Synchronisierten Verkehr zeigt das Fahrzeug im Beispiel aus Teilabbildung (a) eine regelmäßige Abfolge von Geschwindigkeitsmaxima und -minima. In Teilabbildung (b) ist im zeitlichen Geschwindigkeitsverlauf zu sehen, dass das Fahrzeug zunächst bis zu einem Geschwindigkeitsminimum hin verlangsamt. Nach diesem Minimum nimmt die Geschwindigkeit dann zu, und vor Erreichen der Lichtsignalanlage gibt es ein Geschwindigkeitsmaximum.

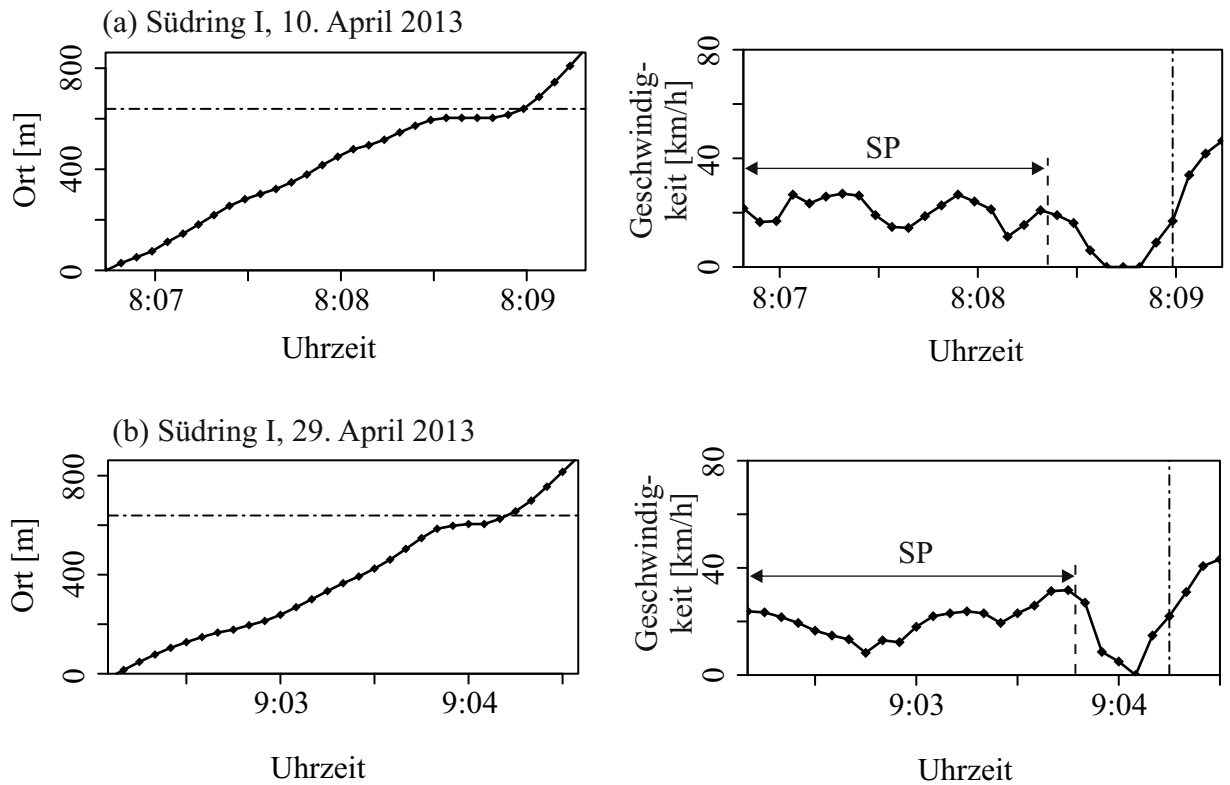


Abbildung 4.11: Empirische Strukturen des Synchronisierten Verkehrs (SP): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten vom Streckenabschnitt „Südring I“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktuierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

4.1 Empirische mikroskopische Phänomene nach Einbruch der Geschwindigkeit

Weitere Beispiele für Strukturen des Synchronisierten Verkehrs auf dem Streckenabschnitt „Südring II“ sind in Abb. 4.12 gezeigt. In Teilabbildung (a) fährt das Fahrzeug vom stromaufwärtigen Streckenbeginn an mit 20 km/h, und der Geschwindigkeitsverlauf ist sehr eben. Ab dem mittleren Teil des Streckenabschnittes schwankt die Geschwindigkeit dann zwischen 15 km/h und 30 km/h. Beim Beispiel aus Teilabbildung (b) verzögert das Fahrzeug zunächst von 40 km/h auf unter 20 km/h. Anschließend schwankt die Geschwindigkeit während der Fahrt durch den Synchronisierten Verkehr zwischen 20 km/h und 35 km/h.

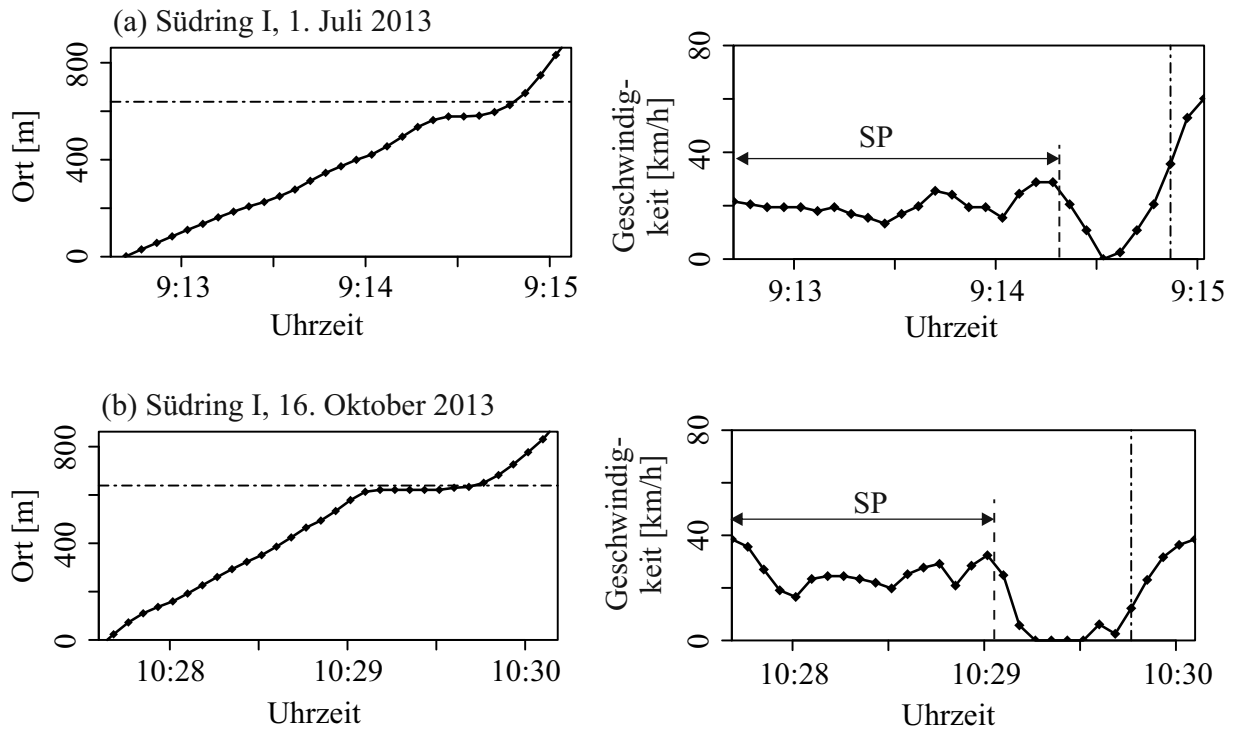


Abbildung 4.12: Empirische Strukturen des Synchronisierten Verkehrs (SP): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten vom Streckenabschnitt „Südring I“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

4 Empirische mikroskopische Eigenschaften des übersättigten innerstädtischen Verkehrs

Eine weitere Trajektorie eines Fahrzeugs, das Synchronisierten Verkehr auf dem Streckenabschnitt „Südring I“ durchfährt, ist in Abb. 4.13 (a) gezeigt. Während der Fahrt durch den Synchronisierten Verkehr schwankt die Fahrzeuggeschwindigkeit in diesem Beispiel um 20 km/h.

In Abb. 4.13 (b) ist eine Fahrzeugtrajektorie gezeigt, die auf dem dritten betrachteten Streckenabschnitt, dem „Südring II“, gemessen wurde. Am stromaufwärtigen Ende des betrachteten Abschnittes verzögert das Fahrzeug zunächst. Nach diesem Verzögerungsvorgang liegt die Geschwindigkeit beim Durchfahren des Synchronisierten Verkehrs meistens unter 15 km/h.

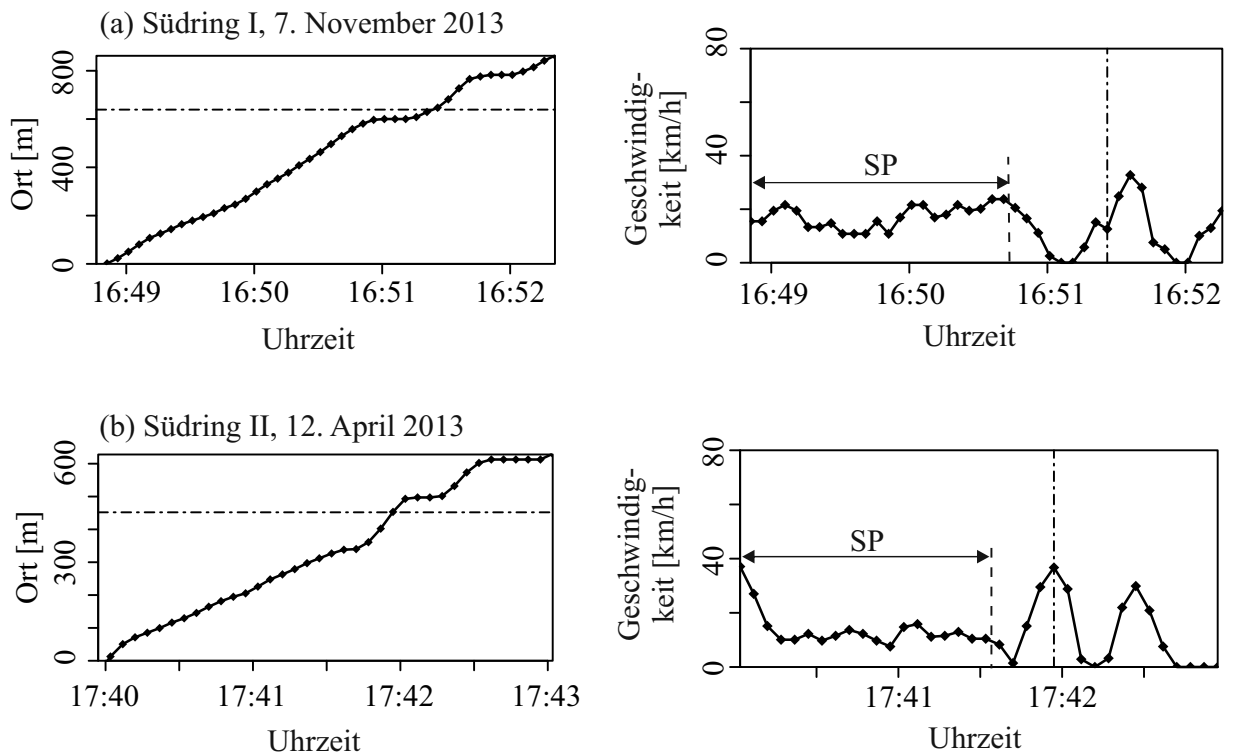


Abbildung 4.13: Empirische Strukturen des Synchronisierten Verkehrs (SP): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten von den Streckenabschnitten „Südring I“ und „Südring II“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

4.1 Empirische mikroskopische Phänomene nach Einbruch der Geschwindigkeit

Zwei weitere Trajektorien von Fahrzeugen, die auf dem Streckenabschnitt „Südring II“ Strukturen des Synchronisierten Verkehrs durchfahren, sind in Abb. 4.14 gezeigt. Entlang der Fahrzeugtrajektorie aus Teilabbildung (a) nimmt die Fahrzeuggeschwindigkeit bis zur Streckenmitte hin ab, bis sie ein Minimum erreicht. Anschließend beschleunigt das Fahrzeug wieder, und kurz vor dem Anhalten an der Lichtsignalanlage hat die Geschwindigkeit ein Maximum. Beim Beispiel aus Teilabbildung (b) erreicht die Geschwindigkeit, kurz nachdem das Fahrzeug in den Streckenabschnitt einfährt, ein Geschwindigkeitsmaximum. Im weiteren Geschwindigkeitsverlauf fällt auf, dass das Fahrzeug sich in der Streckenmitte für ungefähr 20 Sekunden mit sehr niedrigen Geschwindigkeiten zwischen 5 km/h und 10 km/h fortbewegt.

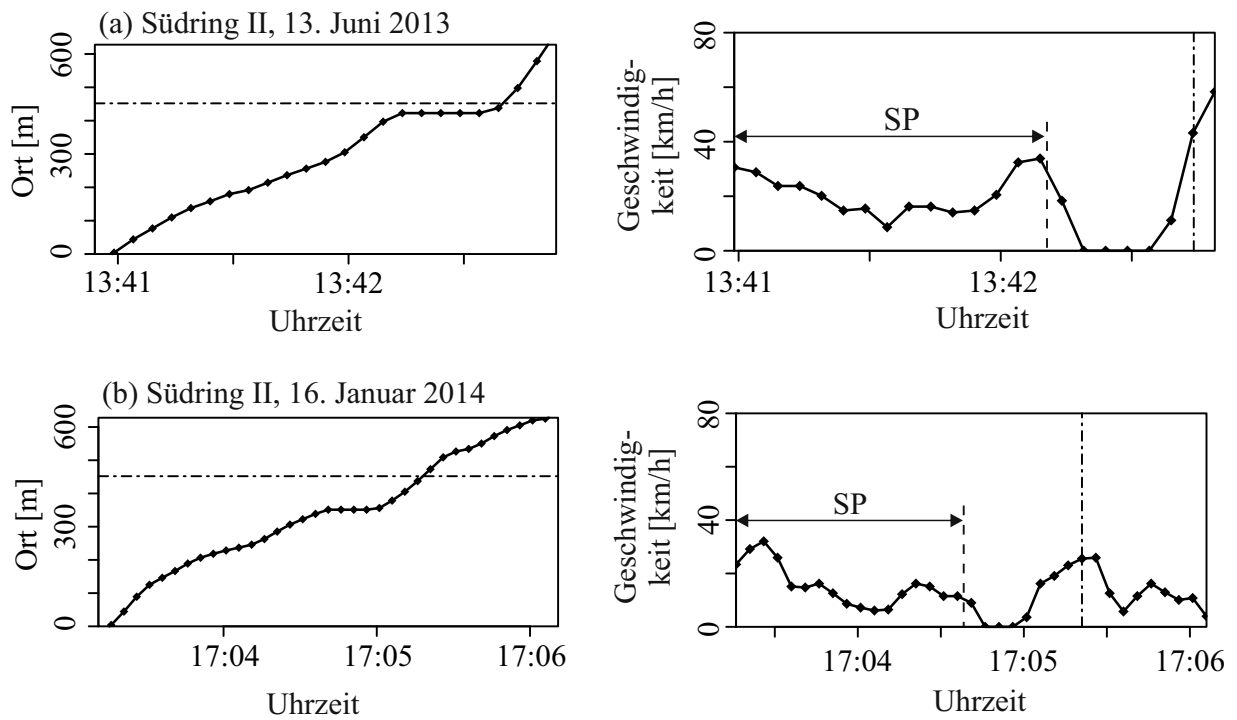


Abbildung 4.14: Empirische Strukturen des Synchronisierten Verkehrs (SP): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten vom Streckenabschnitt „Südring II“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktlierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

4.1.3 Physikalische Eigenschaften von Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs

In den Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 haben wir Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs untersucht und qualitative Merkmale dieser empirischen Verkehrsmuster aufgezeigt. Im Folgenden sollen einige physikalische Eigenschaften empirischer Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs auch quantitativ erfasst werden. Dazu betrachten wir zunächst die folgenden Zusammenhänge (Abb. 4.15).

1. Abhängigkeit des am Detektor gemessenen Verkehrsflusses (vgl. Gl. (2.1)) von der am Detektor gemessenen mittleren Geschwindigkeit (vgl. Gl. (2.2)),
2. Abhängigkeit des am Detektor gemessenen Verkehrsflusses von der mittleren Geschwindigkeit entlang einzelner Fahrzeugtrajektorien beim Durchfahren eines Verkehrsmusters (vgl. Gl. 3.3).

Für alle betrachteten Größen erfolgt die Mittelung über den Zeitraum, in dem ein Fahrzeug eine Struktur des Synchronisierten Verkehrs oder eine Folge von Moving Queues durchfährt, also die in den Abbildungen 4.1–4.14 mit „MQ“ bzw. „SP“ bezeichneten Zeiträume. Da der Verkehrsfluss vom Streckenabschnitt und von Parametern der Lichtsignalanlage wie Zyklusdauer und Rotdauer abhängt, sortieren wir die empirischen Beispiele aus den Abbildungen 4.1–4.14 gemäß dem Streckenabschnitt und Schaltprogramm der Lichtsignalanlage. Wir wählen die Gruppen von Beispielen aus, die mindestens zwei Repräsentanten für Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs beinhalten: (i) „Völklinger Straße“, 6:00–12:00 Uhr, und (ii) Südring, 12:30–19:00 Uhr. Aufgrund einer Umstellung des Schaltprogramms der Lichtsignalanlage an der Kreuzung der Völklinger Straße mit der Fährstraße werden für den Abschnitt „Völklinger Straße“ nur Beispiele herangezogen, die nach dem 14. Juli 2013 gemessen wurden.

Man erkennt in Abb. 4.15, dass Strukturen des Synchronisierten Verkehrs bei ähnlich großen Verkehrsflüssen und am Detektor gemessenen mittleren Geschwindigkeiten beobachtet werden wie Folgen von Moving Queues. Außerdem liegen mittlere Geschwindigkeiten entlang der Fahrzeugtrajektorien während der Fahrt durch Folgen von Moving Queues und durch Synchronisierten Verkehr in den meisten betrachteten Fällen zwischen 10 km/h und 15 km/h. Zudem kann es in Strukturen des Synchronisierten Verkehrs auch höhere mittlere Geschwindigkeiten geben.

4.1 Empirische mikroskopische Phänomene nach Einbruch der Geschwindigkeit

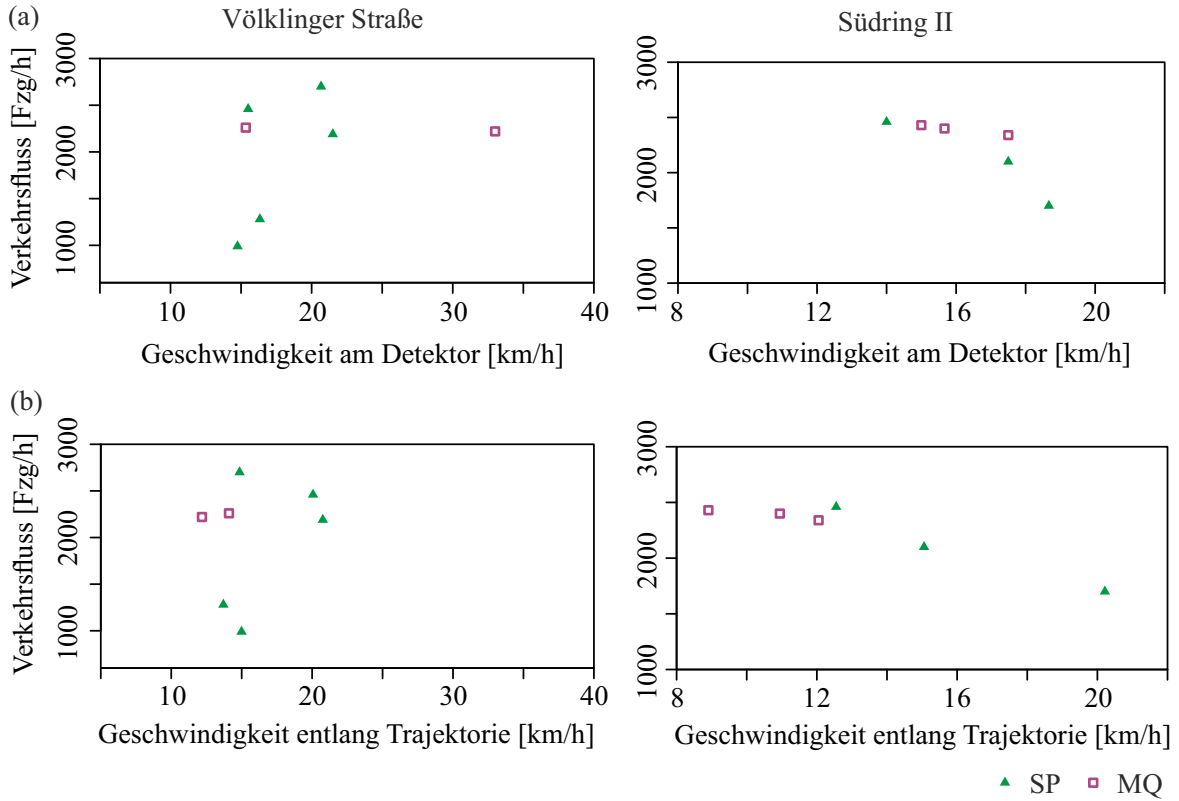


Abbildung 4.15: Vergleich physikalischer Eigenschaften von Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs auf den Streckenabschnitten „Völklinger Straße“ (22.7.2013–16.1.2014) und „Südring II“ (10. April 2013–16.1.2014): Abhängigkeit des am Detektor gemessenen Verkehrsflusses von der am Detektor gemessenen mittleren Geschwindigkeit (a) und von der Geschwindigkeit entlang der Fahrzeugtrajektorie (b).

Als weitere Messgröße ziehen wir für den Vergleich zwischen empirischen Folgen von Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs den Betrag $|\Delta v_n|$ der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden GPS-Messungen mit zeitlichem Abstand von 5 Sekunden heran. Wir betrachten nun die folgenden Zusammenhänge (Abb. 4.16).

1. Abhängigkeit der mittleren $|\Delta v_n|$ von der mittleren Geschwindigkeit entlang einzelner Fahrzeugtrajektorien beim Durchfahren eines Verkehrsmusters,
2. Abhängigkeit der Standardabweichung der mittleren $|\Delta v_n|$ von der mittleren Fahrzeuggeschwindigkeit entlang einzelner Fahrzeugtrajektorien beim Durchfahren eines Verkehrsmusters.

4 Empirische mikroskopische Eigenschaften des übersättigten innerstädtischen Verkehrs

Es werden dieselben Mittelungsintervalle benutzt wie in der vorigen Untersuchung der Verkehrsflüsse und mittleren Geschwindigkeiten aus Abb. 4.15, auch die Gruppierung gemäß Streckenabschnitt und Lichtsignalanlagenprogramm ist dieselbe.

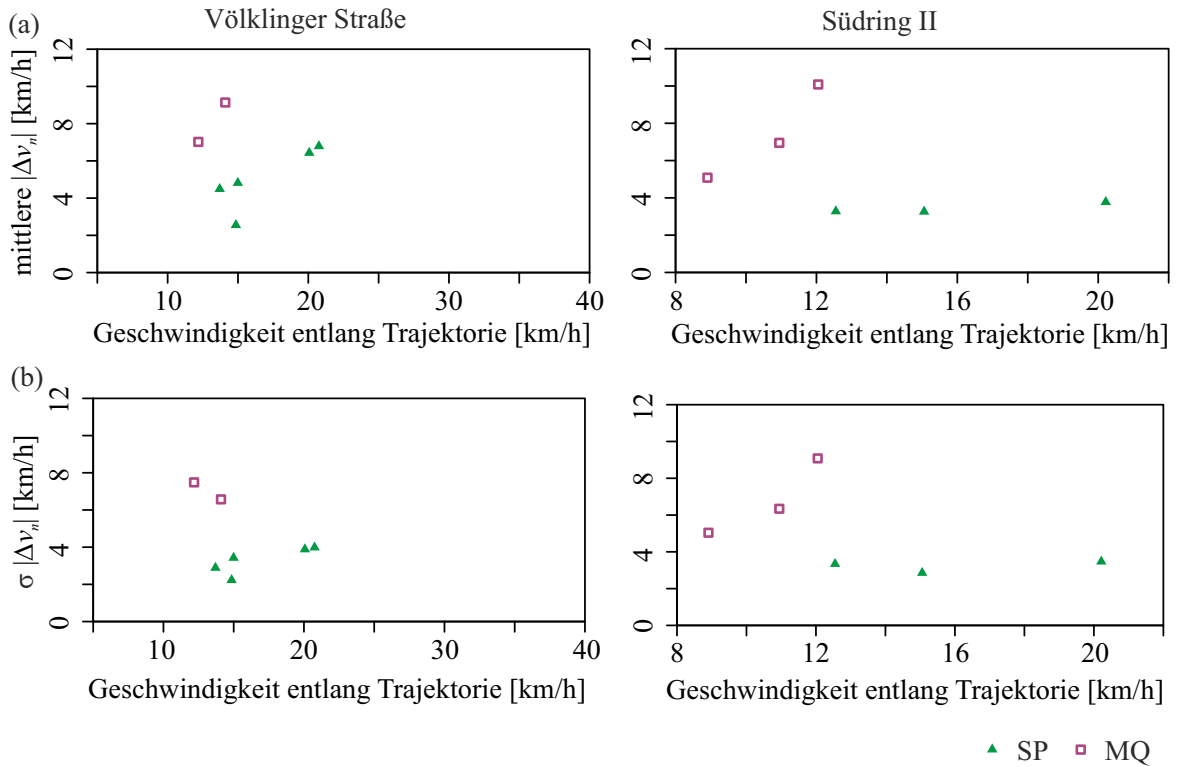


Abbildung 4.16: Vergleich physikalischer Eigenschaften von Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs auf den Streckenabschnitten „Völklinger Straße“ (22.7.2013–16.1.2014) und „Südring II“ (10. April 2013–16.1.2014). $|\Delta v_n|$ bezeichnet den Betrag der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen aufeinanderfolgenden GPS-Messungen, σ die Standardabweichung.

In Abb. 4.16 sind deutliche Unterschiede zwischen Folgen von Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs im Hinblick auf die betragsmäßigen Geschwindigkeitsdifferenzen $|\Delta v_n|$ erkennbar: In Folgen von Moving Queues sind die mittleren $|\Delta v_n|$ größer als in Strukturen des Synchronisierten Verkehrs (vgl. Abb. 4.16 (a)). Auch sind in Folgen von Moving Queues die Standardabweichungen der mittleren $|\Delta v_n|$ größer als in Strukturen des Synchronisierten Verkehrs (vgl. Abb. 4.16 (b)).

4.1.4 Kombinationen von Moving Queues und Synchronisiertem Verkehr

In den Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 sind regelmäßige Folgen von Moving Queues sowie Strukturen des Synchronisierten Verkehrs als grundlegende Verkehrsmuster im übersättigten Verkehr an Lichtsignalanlagen vorgestellt worden. Wie in diesem Abschnitt gezeigt wird, besteht empirischer übersättigter Verkehr nach Einbruch der Geschwindigkeit typischerweise aus Kombinationen von Moving Queues und Synchronisiertem Verkehr.

Mischungen von Moving Queues und Synchronisiertem Verkehr in Einzelfahrzeugdaten

Viele empirische Fahrzeugtrajektorien im übersättigten Verkehr zeigen entlang ihres Verlauf sowohl Eigenschaften von Moving Queues als auch Eigenschaften von Synchronisiertem Verkehr. In manchen Gebieten in Raum und Zeit bewegt sich das Fahrzeug dabei durch Synchronisierten Verkehr und in anderen Gebieten trifft es auf Moving Queues. In diesem Abschnitt diskutieren wir solche Mischungen der Verkehrsmuster anhand von Trajektorien einzelner Fahrzeuge. In den Geschwindigkeitsverläufen entlang der Fahrzeugtrajektorien, die in den Abbildungen wieder auf der rechten Seite gezeigt sind, sind die jeweiligen Anteile der Fahrt dem Verkehrsmuster entsprechend auch in diesem Abschnitt mit „MQ“ (Moving Queue) bzw. „SP“ (Synchronisierter Verkehr) gekennzeichnet. Der Stillstand direkt stromabwärts der Position der Lichtsignalanlage, der im übersättigten Verkehr unabhängig vom jeweiligen Verkehrsmuster auftritt, ist wie in den Abbildungen der vorigen Abschnitte nicht markiert.

Zwei Fahrzeugtrajektorien und zugehörige Geschwindigkeitsverläufe vom Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ aus den Jahren 2011 und 2013, in denen sich sowohl Moving Queues als auch Synchronisierter Verkehr beobachten lassen, sind in Abb. 4.17 gezeigt. In beiden Beispielen bewegt sich das jeweilige Fahrzeug zunächst durch Synchronisierten Verkehr und trifft in der stromabwärtigen Hälfte des betrachteten Streckenabschnittes auf Moving Queues. Dabei hält es nicht nur direkt an der Lichtsignalanlage, wie es auch bei den in Abschnitt 4.1.2 diskutierten Beispielen der Fall war, sondern es gibt bereits zuvor zusätzliche Anhaltvorgänge in Moving Queues. Dabei gibt es im Beispiel aus Teilabbildung (a) einen zusätzlichen Stillstand im Vergleich zu Teilabbildung (b). Dagegen dauert die Fahrt durch den Synchronisierten Verkehr beim Beispiel aus Teilabbildung (b) deutlich länger an.

4 Empirische mikroskopische Eigenschaften des übersättigten innerstädtischen Verkehrs

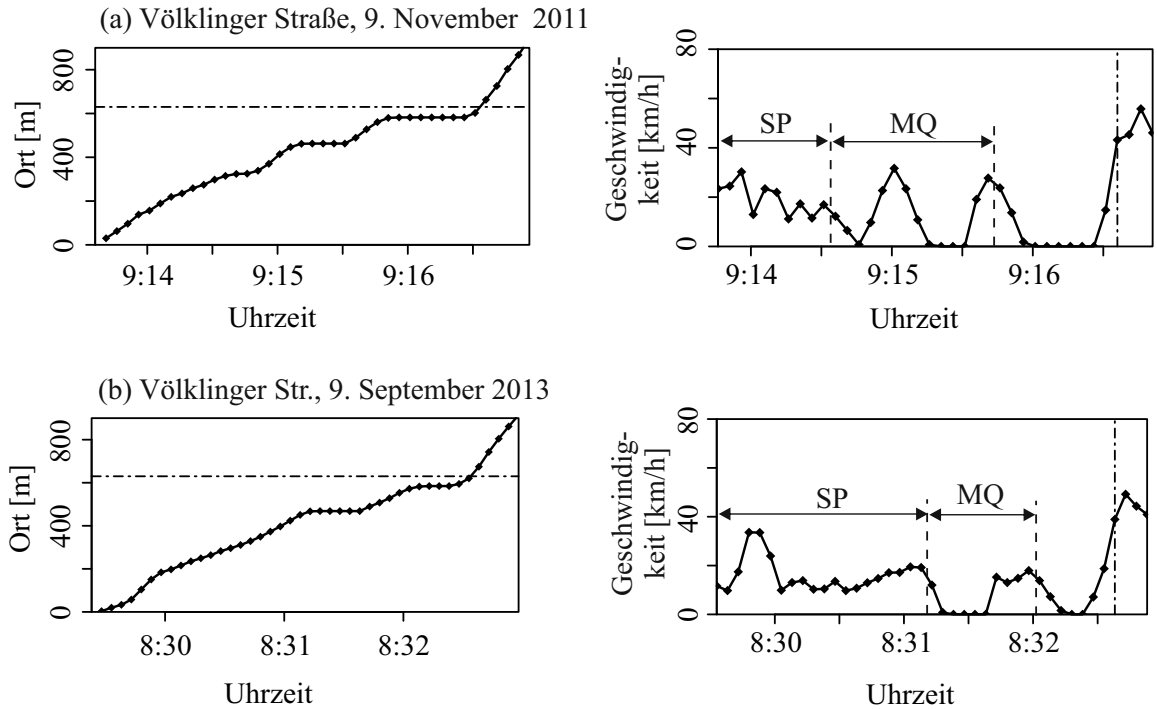


Abbildung 4.17: Mischungen aus Moving Queues (MQ) und Synchronisiertem Verkehr (SP): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten vom Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

Auf den anderen beiden untersuchten Streckenabschnitten, „Südring I“ und „Südring II“, lässt sich ebenfalls beobachten, dass sich Fahrzeuge zunächst durch Synchronisierten Verkehr bewegen und weiter stromabwärts dann Moving Queues antreffen. Hierfür sind Beispiele in Abb. 4.18 gezeigt. Auch diese beiden Beispiele unterscheiden sich bezüglich der Anzahl an Moving Queues. Zudem ist der Übergang vom Synchronisierten Verkehr zu den Moving Queues in Teilabbildung (a) abrupt und das Fahrzeug muss innerhalb kurzer Zeit verzögern. In Teilabbildung (b) dagegen fährt das Fahrzeug bereits im Synchronisierten Verkehr mit niedriger Geschwindigkeit, bevor es aufgrund von Moving Queues abbremsen muss.

4.1 Empirische mikroskopische Phänomene nach Einbruch der Geschwindigkeit

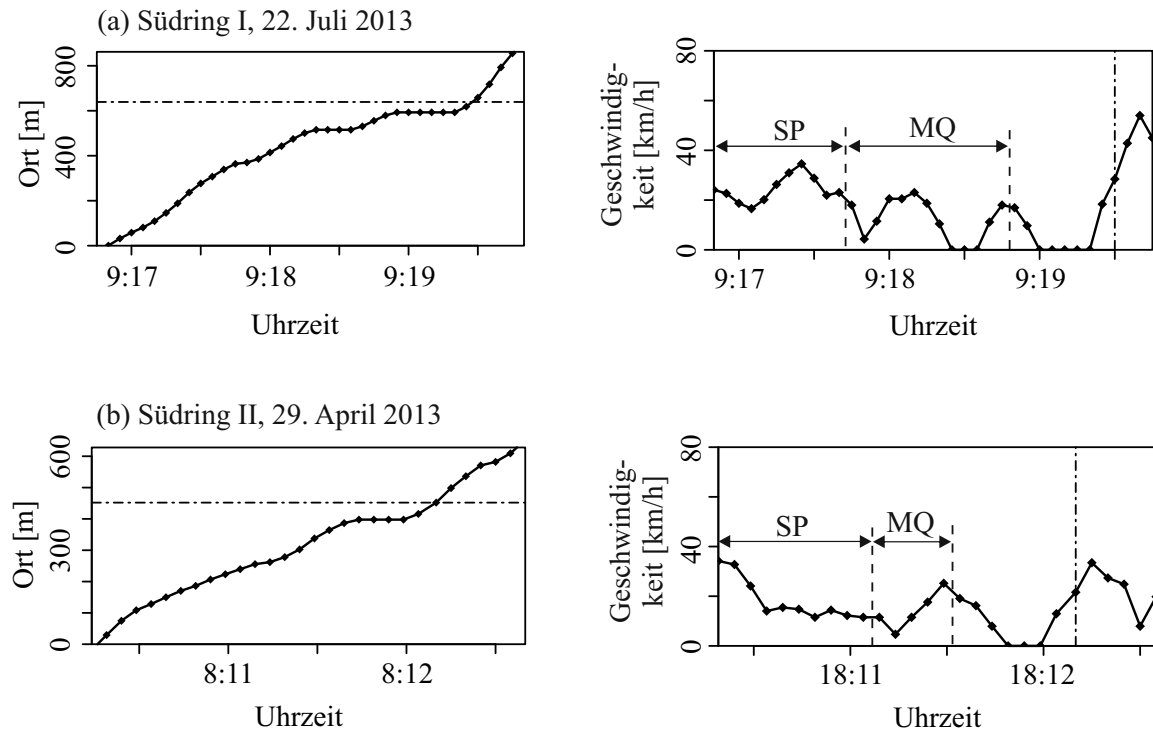


Abbildung 4.18: Mischungen aus Moving Queues (MQ) und Synchronisiertem Verkehr (SP): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten von den Streckenabschnitten „Südring I“ und „Südring II“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

In Abb. 4.19 sind wieder zwei Fahrzeugtrajektorien von der „Völklinger Straße“ gezeigt. Sie unterscheiden sich von den vorigen Beispielen aus diesem Abschnitt dadurch, dass das jeweilige Fahrzeug direkt nach Einfahrt in den Streckenabschnitt in einer Moving Queue anhält. Nachdem es beim Verlassen dieser Moving Queue wieder beschleunigt, durchfährt es Synchronisierten Verkehr und kommt erst an der Lichtsignalanlage wieder zum Stehen. Die Fahrt durch den Synchronisierten Verkehr ist jeweils gekennzeichnet durch Geschwindigkeitsschwankungen, und in der stromabwärtigen Streckenhälfte sind deutliche Geschwindigkeitsmaxima zu erkennen. Diese Eigenschaften des Geschwindigkeitsverlaufes sind typisch für Synchronisierten Verkehr, wie auch einige Beispiele aus Abschnitt 4.1.2 gezeigt haben.

4 Empirische mikroskopische Eigenschaften des übersättigten innerstädtischen Verkehrs

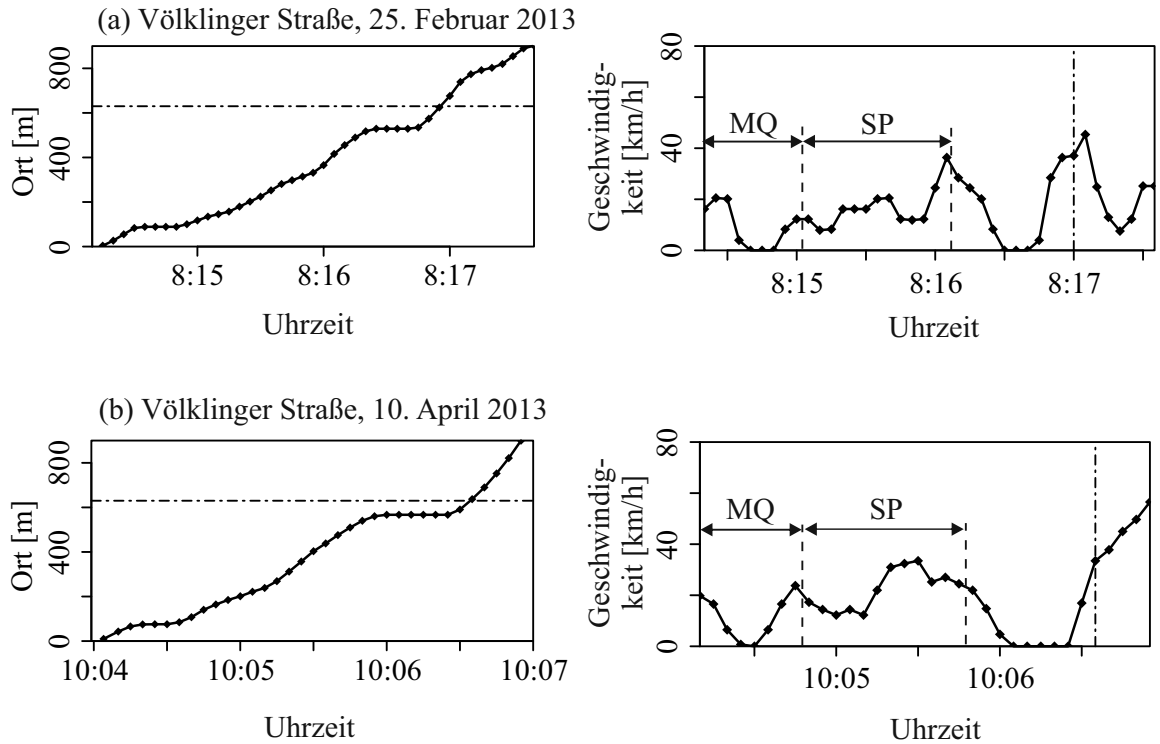


Abbildung 4.19: Mischungen aus Moving Queues (MQ) und Synchronisiertem Verkehr (SP): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten vom Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

Auch bei den Beispielen von den Streckenabschnitten „Südring I“ und „Südring II“, die in Abb. 4.20 gezeigt sind, treffen die Fahrzeuge zunächst im stromaufwärtigen Teil des jeweiligen Streckenabschnittes auf eine Moving Queue und durchfahren anschließend Synchronisierten Verkehr. In beiden Fällen fahren die Fahrzeuge mit ungefähr 40 km/h in den Streckenabschnitt ein und verzögern dann beim Auffahren auf die Moving Queue stark. Bei der anschließenden Fahrt durch den Synchronisierten Verkehr haben beide Geschwindigkeitsverläufe kurz vor dem Warten an der Lichtsignalanlage ein lokales Geschwindigkeitsmaximum. Die beiden gezeigten Beispiele unterscheiden sich durch unterschiedliche Fahrzeuggeschwindigkeiten im Synchronisierten Verkehr. In Teilabbildung (a) schwankt die Geschwindigkeit während der Fahrt durch den Synchronisierten Verkehr um den Wert 20 km/h, wogegen in Teilabbildung (b) die Fahrzeuggeschwindigkeit mit Ausnahme des Geschwindigkeitsmaximums vor der Lichtsignalanlage deutlich niedriger ist als 20 km/h.

4.1 Empirische mikroskopische Phänomene nach Einbruch der Geschwindigkeit

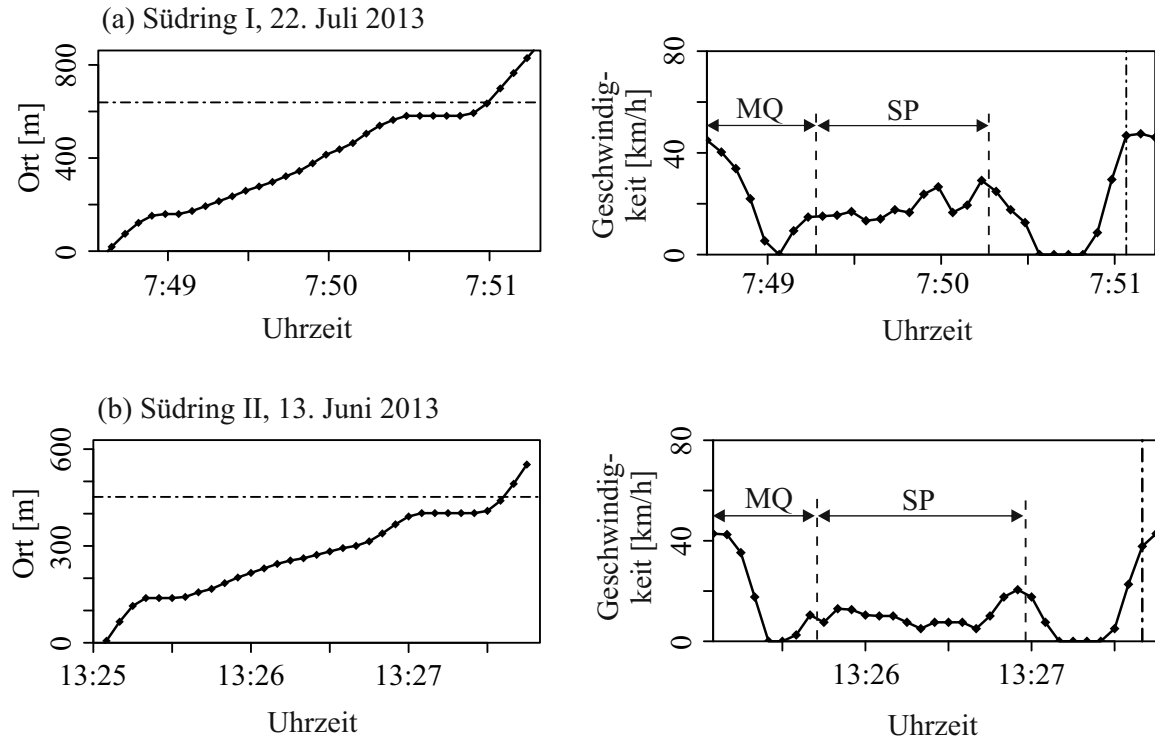


Abbildung 4.20: Mischungen aus Moving Queues (MQ) und Synchronisiertem Verkehr (SP): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten von den Streckenabschnitten „Südring I“ und „Südring II“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

In Abb. 4.21 sind weitere Trajektorien von Fahrzeugen gezeigt, die auf der „Völklinger Straße“ sowohl Synchronisierten Verkehr durchfahren als auch in Moving Queues zum Stehen kommen. In diesen beiden Fällen treffen die Fahrzeuge den Synchronisierten Verkehr in der Streckenmitte an und kommen vorher und nachher in Moving Queues zum Stehen. In beiden Fällen dauert die Zeit zwischen den Stopps vor und nach der Durchfahrt des Synchronisierten Verkehrs ungefähr eine Minute. Zwischen diesen beiden Stopps in Moving Queues hat die Geschwindigkeit in Teilabbildung (a) im Zeitraum von 7:29 Uhr bis 7:30 Uhr ein ausgeprägtes Maximum, wogegen es in Teilabbildung (b) im Geschwindigkeitsverlauf zwischen 8:38 Uhr und 8:39 Uhr zwei deutliche Maxima gibt.

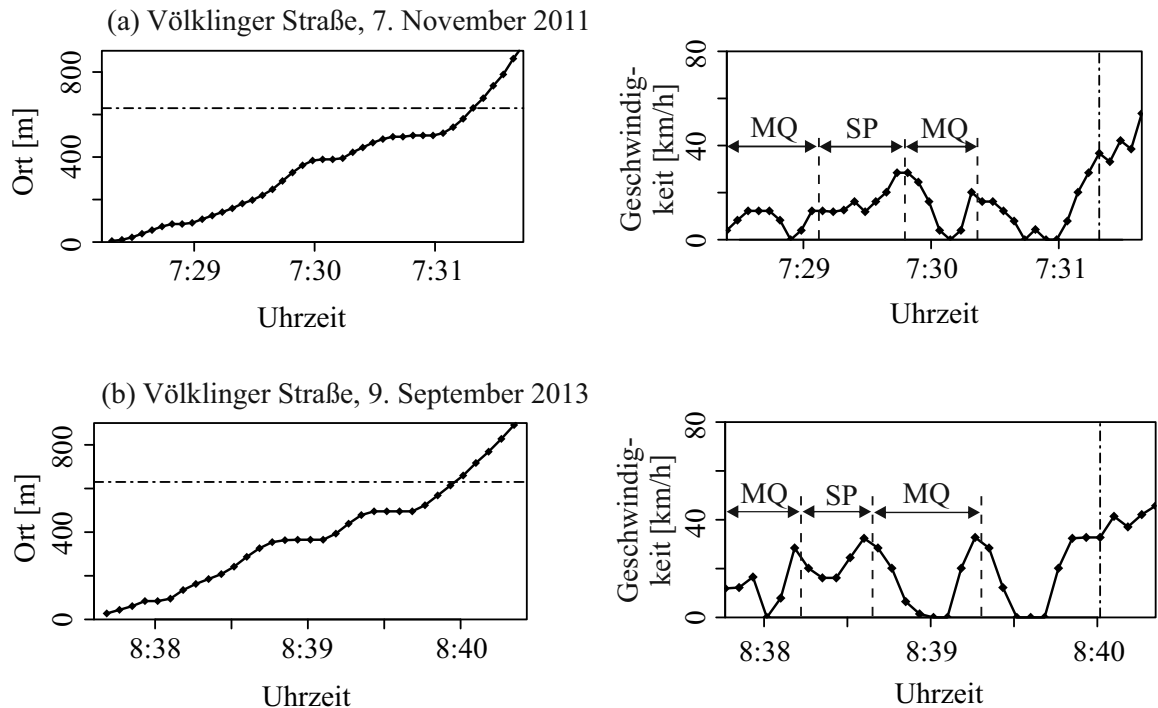


Abbildung 4.21: Mischungen aus Moving Queues (MQ) und Synchronisiertem Verkehr (SP): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten vom Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

Ein weiteres Beispiel von der „Völklinger Straße“, bei dem das Fahrzeug vor und nach dem Durchfahren von Synchronisiertem Verkehr in Moving Queues anhält, ist in Abb. 4.22 (a) gezeigt. Hier durchfährt das Fahrzeug in der Streckenmitte für etwa anderthalb Minuten Synchronisierten Verkehr. Damit hat die Fahrt durch den Synchronisierten Verkehr in diesem Fall einen größeren zeitlichen Anteil an der gesamten Fahrt auf dem Streckenabschnitt als bei den Beispielen aus Abb. 4.21.

Auch die in Abb. 4.22 (b) gezeigte Trajektorie eines Fahrzeugs, das den Streckenabschnitt „Südring II“ durchfährt, weist denselben zeitlichen Ablauf von Verkehrsmustern auf wie die drei zuletzt diskutierten Beispiele von der „Völklinger Straße“: zuerst eine Moving Queue, dann in der Streckenmitte Synchronisierter Verkehr, und anschließend wieder Moving Queues.

4.1 Empirische mikroskopische Phänomene nach Einbruch der Geschwindigkeit

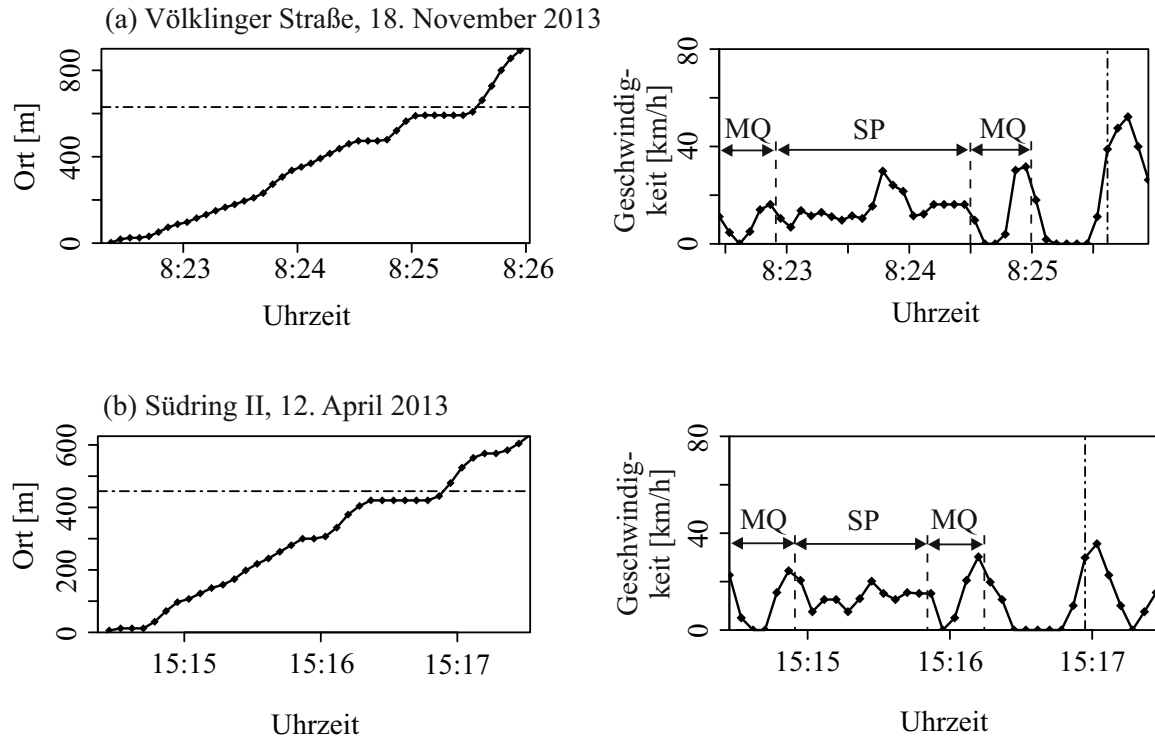


Abbildung 4.22: Mischungen aus Moving Queues (MQ) und Synchronisiertem Verkehr (SP): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten von den Streckenabschnitten „Völklinger Straße“ und „Südring II“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

In Abb. 4.23 sind zwei Trajektorien von Fahrzeugen, die die „Völklinger Straße“ durchfahren, gezeigt. Die Weg-Zeit-Diagramme auf der linken Seite der Abbildung ähneln denen in den Abbildungen 4.1–4.4 im Abschnitt 4.1.1 über klassische Folgen von Moving Queues: Die ebenen Teilstücke, die sich gleichmäßig über den Streckenabschnitt verteilen, zeigen, dass das Fahrzeug über einen Großteil der Strecke eine Folge von Moving Queues durchfährt. Auch über den größten Teil der Geschwindigkeitsverläufe entlang der Strecke sind die Abfolgen von Stillständen, Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen zu erkennen, die für Moving Queues typisch sind. Nur am linken Rand der Geschwindigkeitsverläufe kann man sehen, dass die Geschwindigkeit der Fahrzeuge für etwa 30 Sekunden um 20 km/h (Teilabbildung (a)) bzw. 15 km/h (Teilabbildung (b)) schwankt. Dieses Fahren mit niedriger Geschwindigkeit ist typisch für Synchronisierten Verkehr.

4 Empirische mikroskopische Eigenschaften des übersättigten innerstädtischen Verkehrs

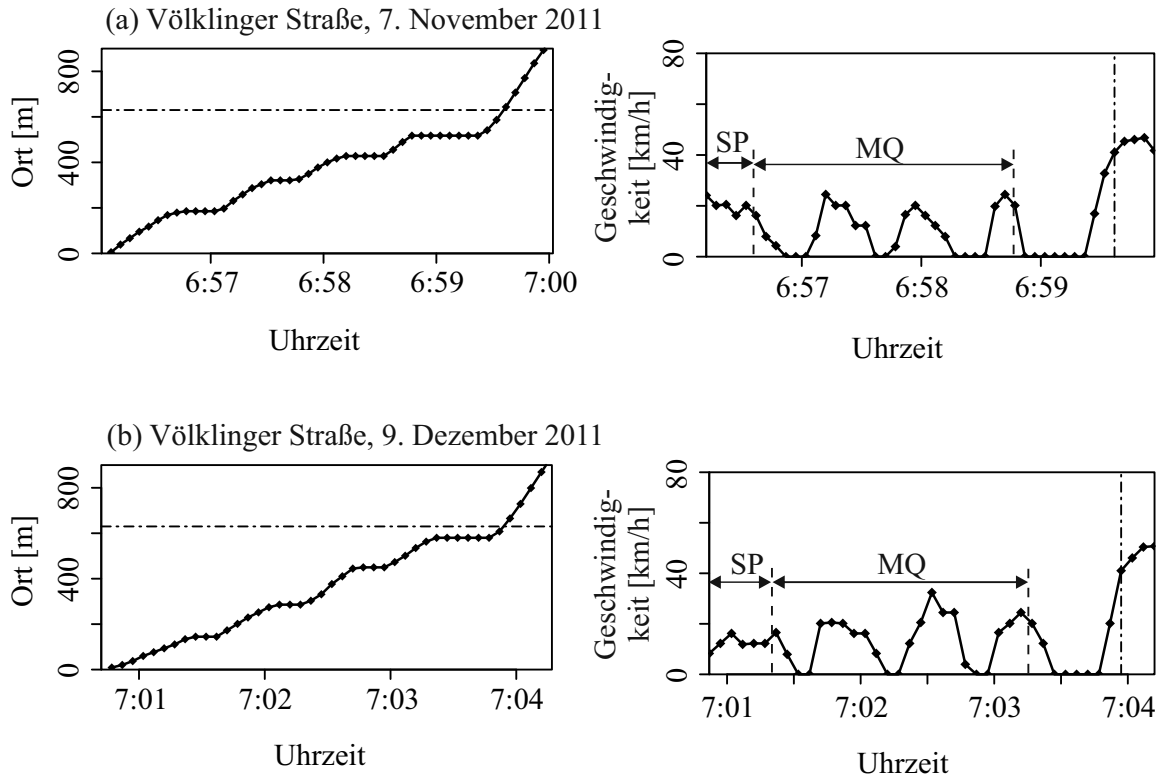


Abbildung 4.23: Mischungen aus Moving Queues (MQ) und Synchronisiertem Verkehr (SP): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten vom Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

Zwei weitere Fahrzeugtrajektorien von der „Völklinger Straße“ sind in Abb. 4.24 gezeigt. Wie in den beiden zuvor diskutierten Beispielen (Abb. 4.23) treffen die Fahrzeuge über den Großteil der Strecke Moving Queues an. Doch auch in diesen Beispielen zeigen die Fahrzeuge, direkt nachdem sie am stromaufwärtigen Ende in den Streckenabschnitt einfahren, Fahrverhalten, das von Geschwindigkeitsschwankungen bei niedrigen Geschwindigkeiten gekennzeichnet ist und für den Synchronisierten Verkehr typisch ist.

4.1 Empirische mikroskopische Phänomene nach Einbruch der Geschwindigkeit

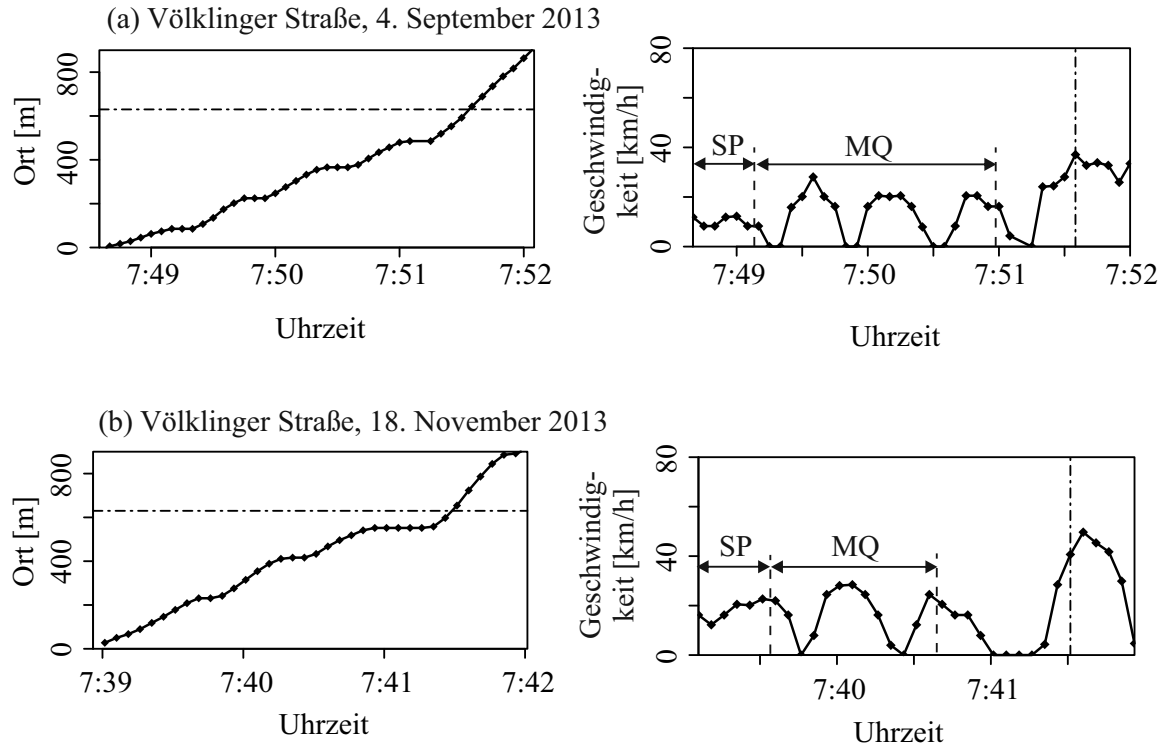


Abbildung 4.24: Mischungen aus Moving Queues (MQ) und Synchronisiertem Verkehr (SP): Trajektorien einzelner Fahrzeuge (links) und mikroskopische Geschwindigkeiten (rechts) entlang dieser Trajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten vom Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktierten Linien markieren den Ort der LSA (links) bzw. den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

Als Zusammenfassung dieses Abschnittes sind im Folgenden vier verschiedene Muster aufgezählt, denen sich die diskutierten Mischungen aus Synchronisiertem Verkehr und Moving Queues zuordnen lassen.

1. Im stromaufwärtigen Teil des Streckenabschnittes durchfährt das Fahrzeug Synchronisierten Verkehr und trifft nur in der stromabwärtigen Hälfte auf Moving Queues. Die Anzahl von Moving Queues kann dabei variieren (Abbildungen 4.17, 4.18).
2. Das Fahrzeug trifft am stromaufwärtigen Ende des Abschnittes auf eine Warteschlange, und durchfährt nach dem Beschleunigen aus dieser Warteschlange Synchronisierten Verkehr (Abbildungen 4.19, 4.20).
3. Sowohl am stromabwärtigen als auch am stromaufwärtigen Ende trifft das Fahrzeug auf Moving Queues und durchfährt zwischendurch Synchronisierten Verkehr. Hierbei handelt es sich um eine Kombination der ersten beiden Muster (Abbildungen 4.21, 4.22).

- Über den größten Teil der Strecke durchfährt das Fahrzeug Folgen von Moving Queues. Nur am stromaufwärtigen Ende lässt sich typisches Fahrverhalten des Synchronisierten Verkehrs beobachten (Abbildungen 4.23, 4.24).

Räumlich-zeitliche Struktur des übersättigten Verkehrs nach Einbruch der Geschwindigkeit

Nachdem wir bislang einzelne Trajektorien betrachtet haben, behandeln wir in diesem Abschnitt Folgen von Trajektorien zufällig im Verkehrsfluss verteilter Fahrzeuge mit Navigationsgeräten. Wir betrachten solche Ausschnitte zeitlich-räumlicher Verkehrsmuster von allen drei in dieser Arbeit betrachteten Streckenabschnitten.

Völklinger Straße

Ein Weg-Zeit-Diagramm mit fünf Trajektorien von Fahrzeugen, die im betrachteten Zeitraum von der „Völklinger Straße“ anonymisierte GPS-Daten gesendet haben, ist in Abb. 4.25 gezeigt.

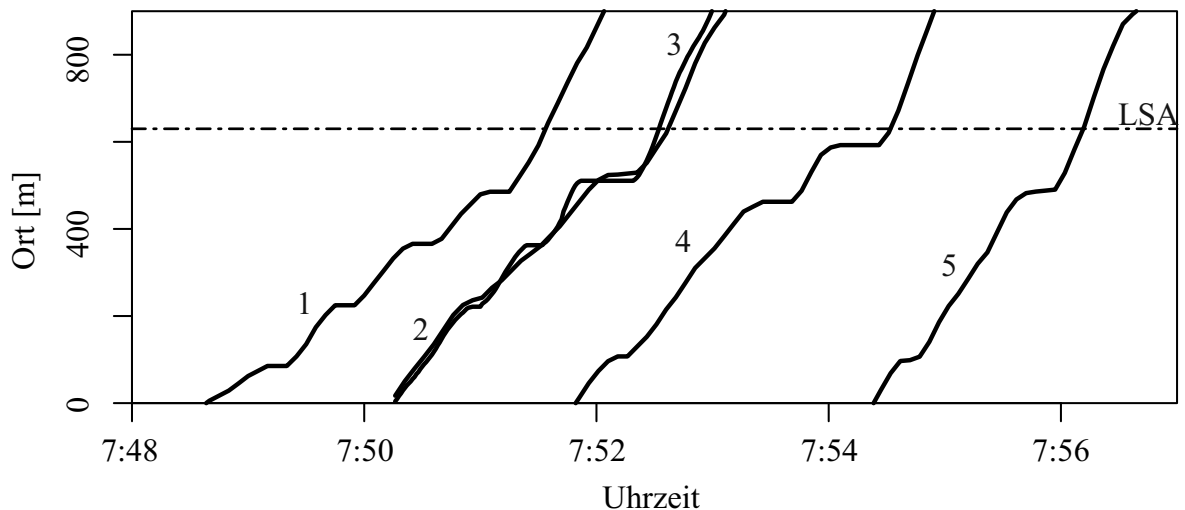


Abbildung 4.25: Ausschnitt eines räumlich-zeitlichen Verkehrsmusters, gemessen auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1) am 4. September 2013 (I): Fahrzeugtrajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten in Weg und Zeit. Die strichpunktierte Linie markiert den Ort der LSA.

Die Geschwindigkeitsverläufe entlang der in Abb. 4.25 gezeigten Fahrzeugtrajektorien sind in den Abbildungen 4.26 und 4.27 (a),(b) gezeigt. Die zeitliche Abfolge der Fahrzeugtrajektorien zeigt, wie sich verschiedene Verkehrsmuster in Raum und Zeit abwechseln: Trajektorie 1 durchfährt größtenteils eine regelmäßige Folge von Moving Queues, abgesehen von Synchronisiertem Verkehr während der ersten 30 Sekunden. Auch Trajektorie 2 zeigt

4.1 Empirische mikroskopische Phänomene nach Einbruch der Geschwindigkeit

am stromaufwärtigen Streckenbeginn Eigenschaften des Synchronisierten Verkehrs, und nach 200 Metern trifft das Fahrzeug auf Moving Queues. Bei den Trajektorien 2, 4 und 5 handelt es sich um Mischungen aus Moving Queues und Synchronisiertem Verkehr, bei denen der Anteil des Synchronisierten Verkehrs größer ist als bei den Trajektorien 1 und 2.

Dass Moving Queues und Synchronisierter Verkehr auf verschiedenen Fahrspuren derselben Straße gleichzeitig auftreten können, zeigen Trajektorien 2 und 3 (Abb. 4.26 (b),(c)). Bis 7:51 Uhr haben die beiden Trajektorien ähnliche Geschwindigkeitsverläufe. Danach durchfährt Fahrzeug 2 Synchronisierten Verkehr, während Fahrzeug 3 auf der anderen Fahrspur zweimal in Moving Queues anhält. Die Reisezeiten beider Fahrzeuge auf dem betrachteten Streckenabschnitt sind etwa gleich (130–140 s).

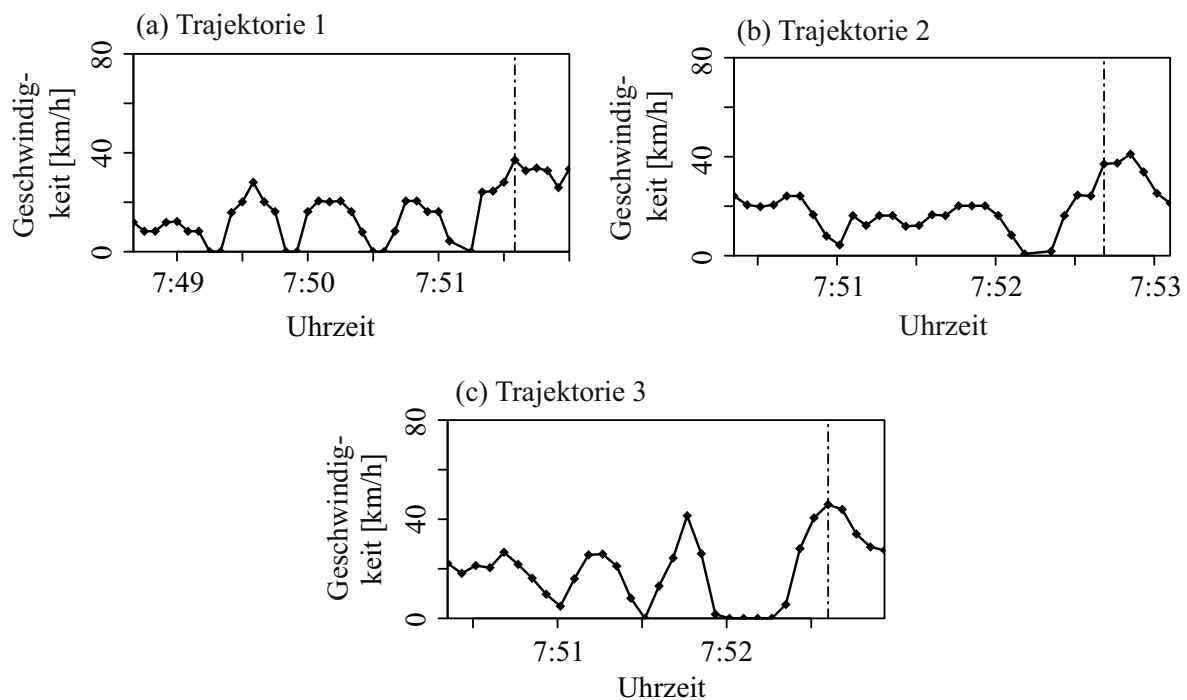


Abbildung 4.26: Ausschnitt eines räumlich-zeitlichen Verkehrsmusters, gemessen auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1) am 4. September 2013 (II): Mikroskopische Geschwindigkeiten entlang der Trajektorien 1–3 aus Abb. 4.25. Trajektorie 1 (a) entspricht Abb. 4.24 (a). Die strichpunktierten Linien markieren den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA.

Die mittlere Geschwindigkeit und der Verkehrsfluss am Detektor „DV“ aus Abb. 3.1 zeigen während des betrachteten Zeitintervalls typisches Verhalten für übersättigten Verkehr nach Einbruch der Geschwindigkeit (vgl. 4.27 (c),(d)): Die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit am Detektor ist stets geringer als 30 km/h, während für den Verkehrsfluss Werte von über 2000 Fahrzeugen pro Stunde gemessen werden.

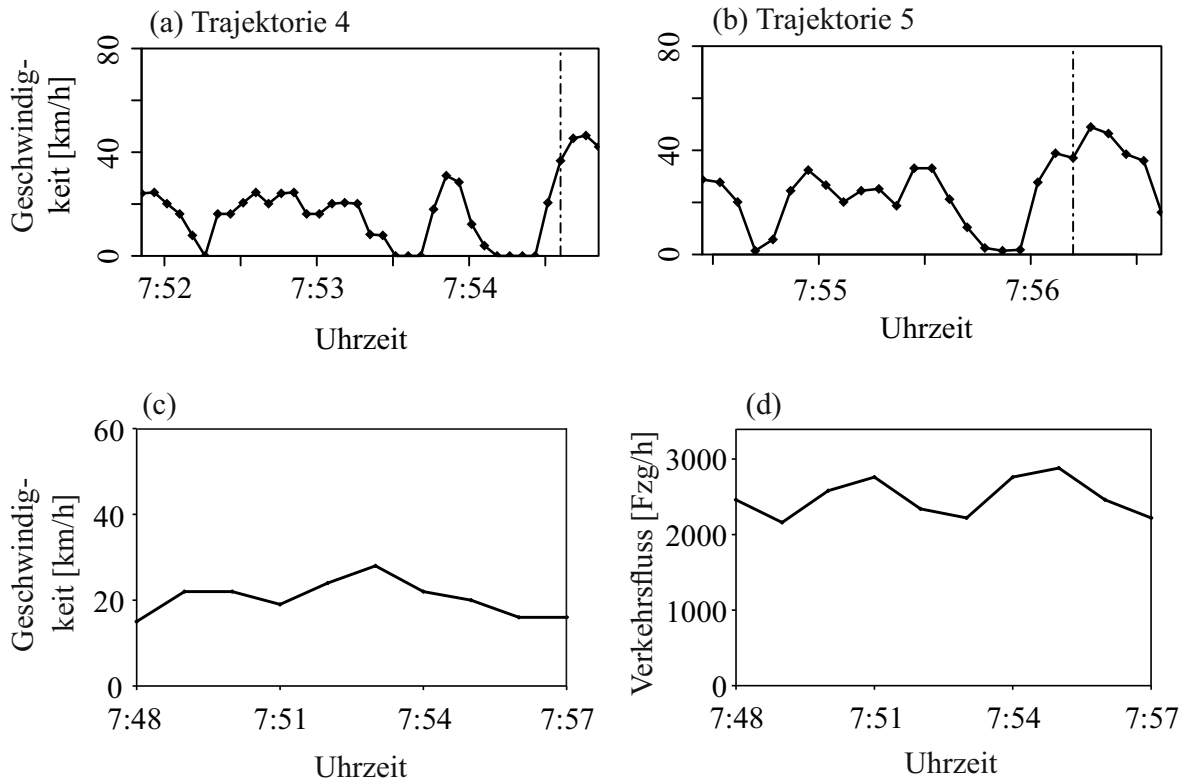


Abbildung 4.27: Ausschnitt eines räumlich-zeitlichen Verkehrsmusters, gemessen auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (Abb. 3.1) am 4. September 2013 (III): (a),(b) Mikroskopische Geschwindigkeiten entlang der Trajektorien 4 und 5 aus Abb. 4.25. (c),(d) Mittlere Geschwindigkeit und Verkehrsfluss für den in Abb. 4.25 betrachteten Zeitraum, gemessen mit dem Detektor „DV“ aus Abbildung 3.1. Die strichpunktierten Linien markieren in (a),(b) den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA.

Südring I

Auch im Ausschnitt eines räumlich-zeitlichen Verkehrsmusters auf dem Streckenabschnitt „Südring I“, der in den Abbildungen 4.28 und 4.29 gezeigt ist, lassen sich Wechsel und Mischformen zwischen Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs beobachten. Dieser Ausschnitt umfasst einen Zeitraum kurz nach dem Übergang vom untersättigten in den übersättigten Verkehr (vgl. Abb. 3.9); bei Trajektorie 1 ist die Verzögerung aus der Freiflussgeschwindigkeit noch erkennbar. Die übrigen Trajektorien zeigen typische Eigenschaften des übersättigten Verkehrs. In den Abbildungen 4.28 (b),(c) und 4.29 (a),(b) sind die Geschwindigkeiten entlang der Trajektorien der geradeaus fahrenden Fahrzeuge abgebildet. Bei den Trajektorien 2 und 3 sind (bis auf das stromaufwärtige Streckenende) regelmäßige Folgen von Moving Queues zu erkennen.

4.1 Empirische mikroskopische Phänomene nach Einbruch der Geschwindigkeit

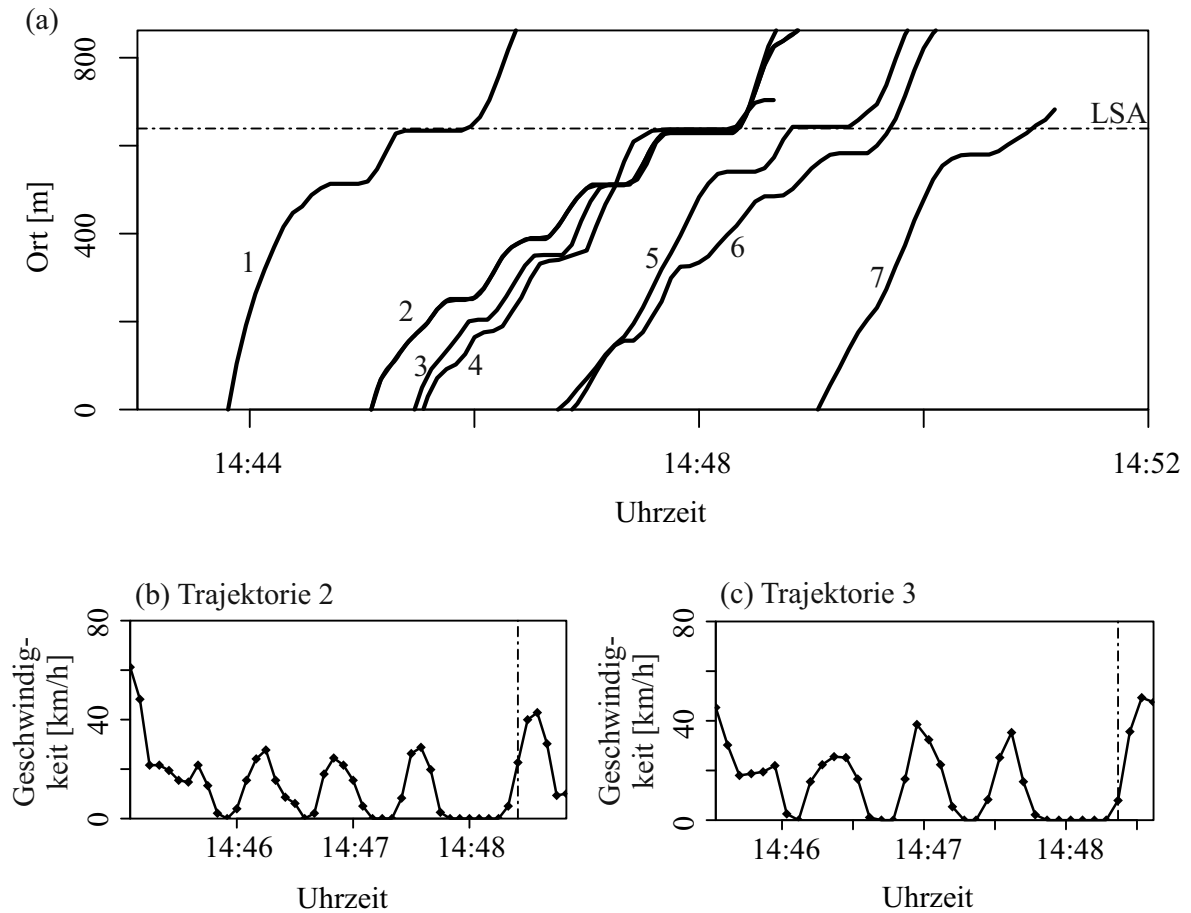


Abbildung 4.28: Ausschnitt eines räumlich-zeitlichen Verkehrsmusters, gemessen auf dem Streckenabschnitt „Südring I“ (vgl. Abb. 3.1) am 12. April 2013 (I): (a) Fahrzeugtrajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten in Weg und Zeit. (b),(c) Mikroskopische Geschwindigkeiten entlang der Trajektorien 2 und 3 aus (a). Die strichpunktierten Linien markieren in (a) den Ort der LSA bzw. in (b),(c) den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA.

Auch bei Trajektorie 6 handelt es sich größtenteils um eine Fahrt durch Moving Queues. Die Trajektorie 5, die zeitlich zwischen diesen Folgen von Moving Queues liegt, weist dagegen bis 14:48 Uhr einen typischen Fahrtverlauf im Synchronisierten Verkehr auf. Die in Abb. 4.29 (c),(d) gezeigten Messwerte des stationären Detektors für das betrachtete Zeitintervall zeigen, dass im betrachteten Zeitraum der Einbruch der Geschwindigkeit bereits die Detektorposition erreicht hat und keine erheblichen Änderungen von mittlerer Geschwindigkeit und Verkehrsfluss über beide Fahrspuren am Detektor beobachtet werden.

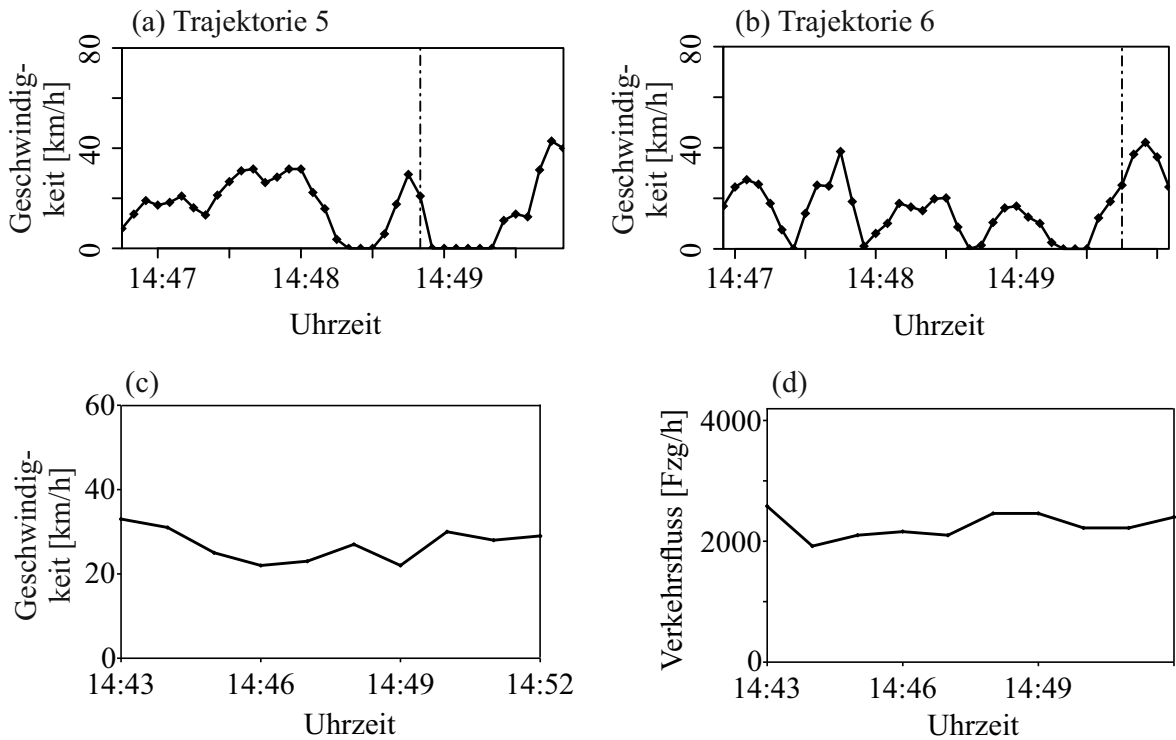


Abbildung 4.29: Ausschnitt eines räumlich-zeitlichen Verkehrsmusters, gemessen auf dem Streckenabschnitt „Südring I“ (Abb. 3.1) am 12. April 2013 (II): (a),(b) Mikroskopische Geschwindigkeiten entlang der Trajektorien 5 und 6 aus Abb. 4.25 (a). (c),(d) Mittlere Geschwindigkeit und Verkehrsfluss für den in Abb. 4.25 betrachteten Zeitraum, gemessen mit dem Detektor „DSI“ aus Abbildung 3.1. Die strichpunktierten Linien markieren in (a),(b) den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA.

Südring II

Dass auch auf dem dritten betrachteten Streckenabschnitt, dem „Südring II“, Mischungen und zeitlich-räumliche Übergänge zwischen Moving Queues und Synchronisiertem Verkehr auftreten, zeigt der Ausschnitt eines Verkehrsmusters in den Abbildungen 4.30–4.32. In Abb. 4.30 (a) ist das entsprechende Weg-Zeit-Diagramm mit fünf Trajektorien einzelner Fahrzeuge aus dem Verkehrsfluss gezeigt. Die zeitlichen Geschwindigkeitsverläufe entlang dieser Trajektorien sind in den Abb. 4.30 (b),(c) und 4.31 zu sehen. Im Fall von Trajektorie 1 durchfährt das Fahrzeug weitgehend Moving Queues. Nur zwischen dem zweiten und dritten Stillstand in Moving Queues kann man typisches Fahrverhalten für den Synchronisierten Verkehr beobachten. Bei Trajektorie 2 herrscht dann Synchronisierter Verkehr über den Großteil der Fahrt vor, abgesehen von einem Stillstand in einer Moving Queue kurz nach dem stromaufwärtigen Streckenbeginn.

4.1 Empirische mikroskopische Phänomene nach Einbruch der Geschwindigkeit

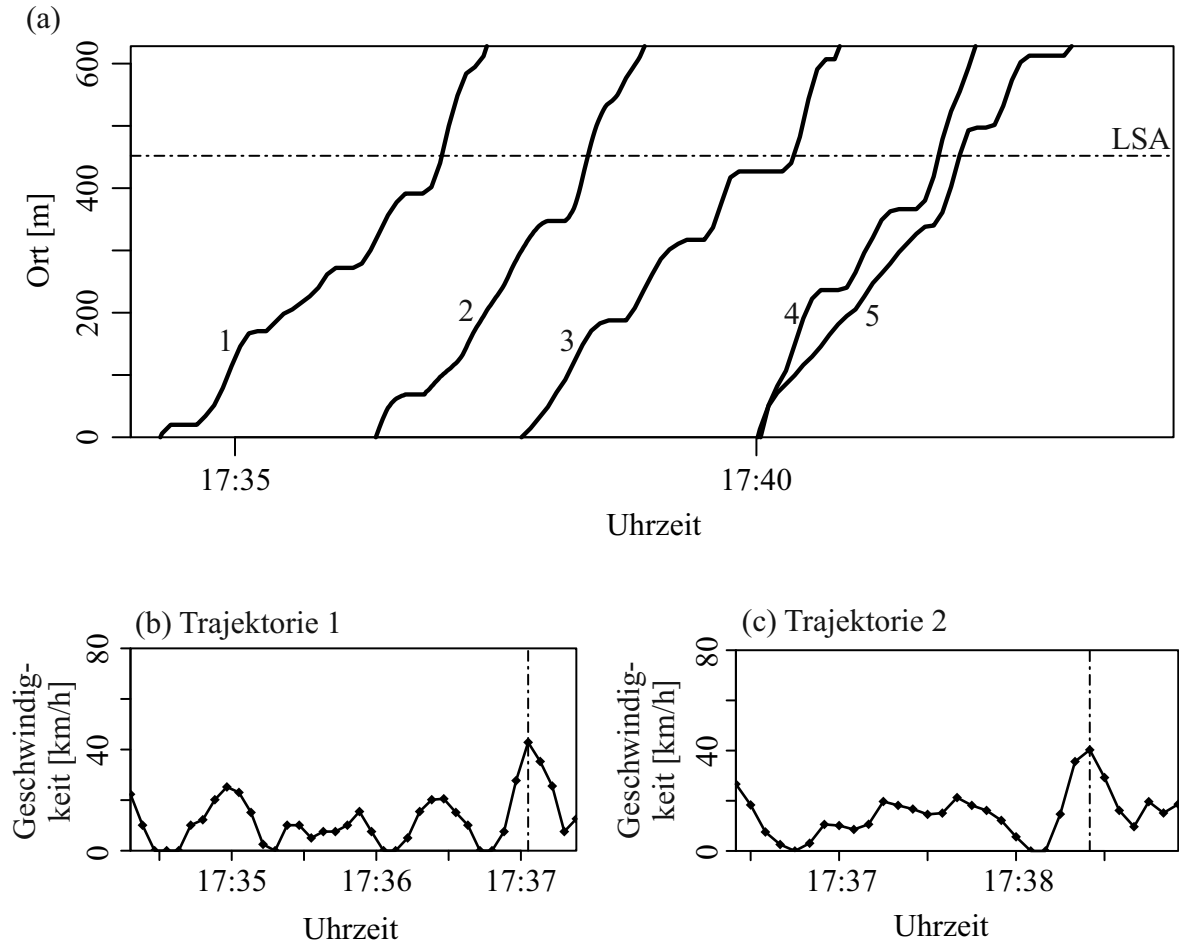


Abbildung 4.30: Ausschnitt eines räumlich-zeitlichen Verkehrsmusters, gemessen auf dem Streckenabschnitt „Südring II“ (vgl. Abb. 3.1) am 12. April 2013 (I): (a) Fahrzeugtrajektorien aus anonymisierten empirischen GPS-Daten in Weg und Zeit. (b),(c) Mikroskopische Geschwindigkeiten entlang der Trajektorien 1 und 2 aus (a). Die strichpunktierten Linien markieren in (a) den Ort der LSA bzw. in (b),(c) den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA.

Bei Trajektorien 3 und 4 sind dann wieder die Moving Queues vorherrschend. Wie in einigen vorigen Beispielen durchfahren die jeweiligen Fahrzeuge nur direkt nach Einfahrt auf den Streckenabschnitt Synchronisierten Verkehr und erreichen bald ein regelmäßiges Muster von Moving Queues. Dabei unterscheiden sich die Trajektorien 3 und 4 in der Anzahl der Stillstände auf dem Streckenabschnitt. Fahrzeug 5 fährt am stromaufwärtigen Streckenbeginn in unmittelbarer Nachbarschaft von Fahrzeug 4. Weniger als hundert Meter vom Streckenbeginn entfernt ändern sich die beiden Fahrtverläufe erheblich, offensichtlich aufgrund eines Spurwechsels. Während das Fahrzeug im Fall von Trajektorie 4 Moving

Queues durchfährt, ist Trajektorie 5 ein Beispiel für eine Fahrt durch Synchronisierten Verkehr.

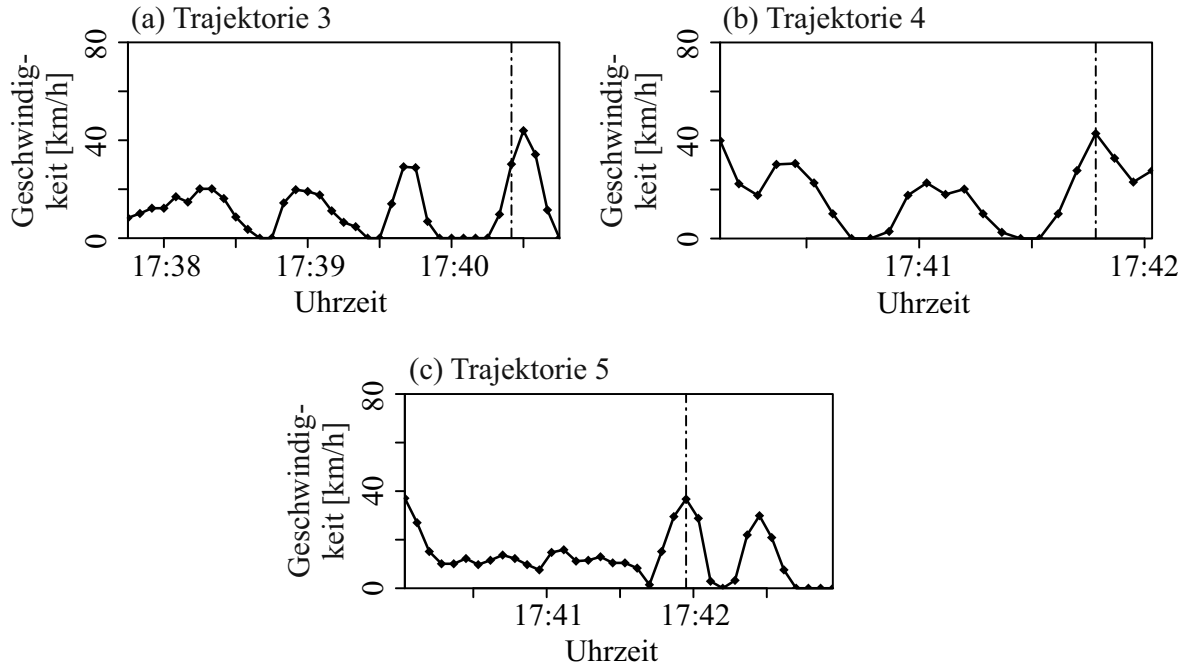


Abbildung 4.31: Ausschnitt eines räumlich-zeitlichen Verkehrsmusters, gemessen auf dem Streckenabschnitt „Südring II“ (Abb. 3.1) am 12. April 2013 (II): Mikroskopische Geschwindigkeiten entlang der Trajektorien 3–5 aus Abb. 4.30 (a). Die strichpunktierten Linien markieren den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA. Das Geschwindigkeitsprofil aus (c) wurde auch in Abb. 4.13 (b) gezeigt.

Mittlere Geschwindigkeit und Verkehrsfluss, die vom Detektor auf dem Streckenabschnitt gemessen wurden, sind in Abb. 4.32 gezeigt. Auch die zeitlichen Muster dieser makroskopischen Daten zeigen dieselben qualitativen Eigenschaften, wie sie auch bei den Beispielen der anderen beiden Streckenabschnitte vorliegen. Mit weniger als 20 km/h liegen mittlere Fahrzeuggeschwindigkeiten vor, die typisch für übersättigten Verkehr auf dem „Südring II“ nach Einbruch der Geschwindigkeit sind. Dass tatsächlich nur die Geschwindigkeit eingebrochen ist, bestätigen die hohen Werte des Verkehrsflusses über die drei Spuren, die stets höher als 2000 Fahrzeuge/h sind.

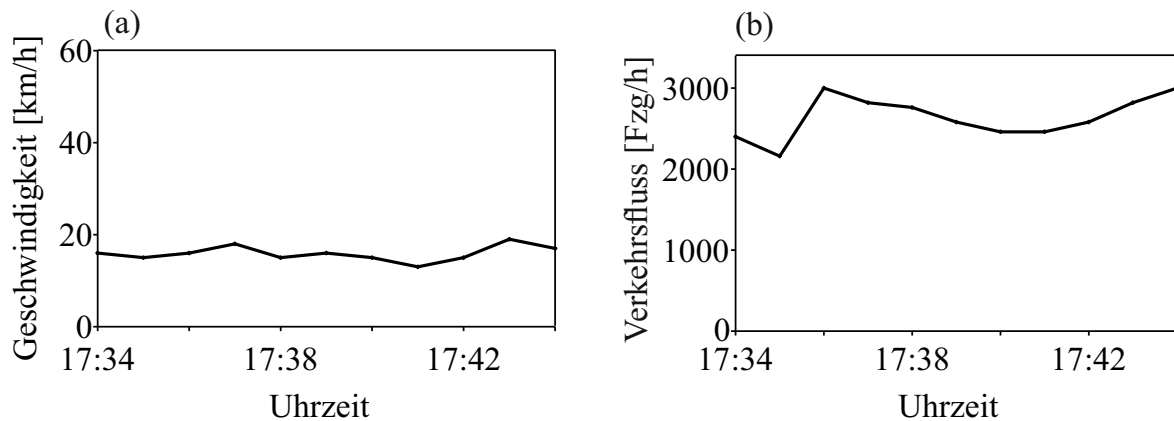


Abbildung 4.32: Ausschnitt eines räumlich-zeitlichen Verkehrsmusters, gemessen auf dem Streckenabschnitt „Südring II“ (Abb. 3.1) am 12. April 2013 (III): Mittlere Geschwindigkeit und Verkehrsfluss für den in Abb. 4.25 betrachteten Zeitraum, gemessen mit dem Detektor „DSII“ aus Abbildung 3.1.

4.2 Empirische Mega-Queue

Bisher haben wir in diesem Kapitel empirische zeitlich-räumliche Verkehrsmuster untersucht, die im übersättigten Verkehr nach Einbruch der Geschwindigkeit zu beobachten sind. In diesem Abschnitt diskutieren wir empirische zeitlich-räumliche Verkehrsmuster, die auftreten, wenn neben der Fahrzeuggeschwindigkeit auch der Verkehrsfluss deutlich geringere Werte annimmt als im untersättigten Verkehr oder im bisher betrachteten übersättigten Verkehr nach Einbruch der Geschwindigkeit.

In Abb. 4.33 (a) ist eine Trajektorie gezeigt, die auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1) gemessen wurde. Die Trajektorie und der ebenfalls abgebildete Geschwindigkeitsverlauf entlang dieser Trajektorie zeigen folgende Eigenschaften: Entlang der Strecke gibt es einige Stillstände, deren Dauern stark variieren. Zwischen diesen Stillständen bewegt sich das Fahrzeug meistens für weniger als 20 Sekunden fort, und die mittlere Geschwindigkeit zwischen zwei GPS-Messungen bleibt entlang dieser kurzen Fahrtstrecken meistens unter 10 km/h. Das Abwechseln zwischen Stillständen und Zeitintervallen der Fortbewegung erfolgt zufällig und lässt keine Regelmäßigkeit erkennen. Hierin besteht ein qualitativer Unterschied zu den in 4.1.1 behandelten Folgen von Moving Queues, wo sich Stillstände und Fahrten von einer Moving Queue zur nächsten Moving Queue regelmäßig abwechseln. Auch unterscheidet sich die vorliegende Fahrzeugtrajektorie von den in Abschnitt 4.1 diskutierten Beispielen bezüglich der Reisezeit auf dem betrachteten Streckenabschnitt: während Fahrzeuge in Moving Queues, Strukturen des Synchronisierten Verkehrs und in den Mischformen dieser Muster stets weniger als 4 Minuten für den 630 m langen Abschnitt der Völklinger Straße benötigen, beträgt die Reisezeit für das Beispiel aus Abb. 4.33 mehr als 10 Minuten.

4 Empirische mikroskopische Eigenschaften des übersättigten innerstädtischen Verkehrs

Die am Detektor gemessenen makroskopischen Messgrößen zu der Zeit, in der das Fahrzeug aus Abb. 4.33 (a) die „Völklinger Straße“ durchfährt, sind in Abb. 4.33 (b) für einen Zeitraum von 20 Minuten gezeigt. Auch ihr Verhalten unterscheidet sich deutlich vom gewöhnlichen Verhalten nach Einbruch der Geschwindigkeit (vgl. Abschnitt 3.3.1): Die mittlere Geschwindigkeit liegt im Durchschnitt unter 10 km/h und ist damit deutlich geringer. Auch fällt auf, dass der Fluss in mehreren Minuten unter 1000 Fahrzeugen/h liegt und um 14:13 Uhr ein deutliches Minimum einnimmt.

Wir bezeichnen das in Abb. 4.33 gezeigte Verkehrsmuster als empirische „Mega-Queue“.

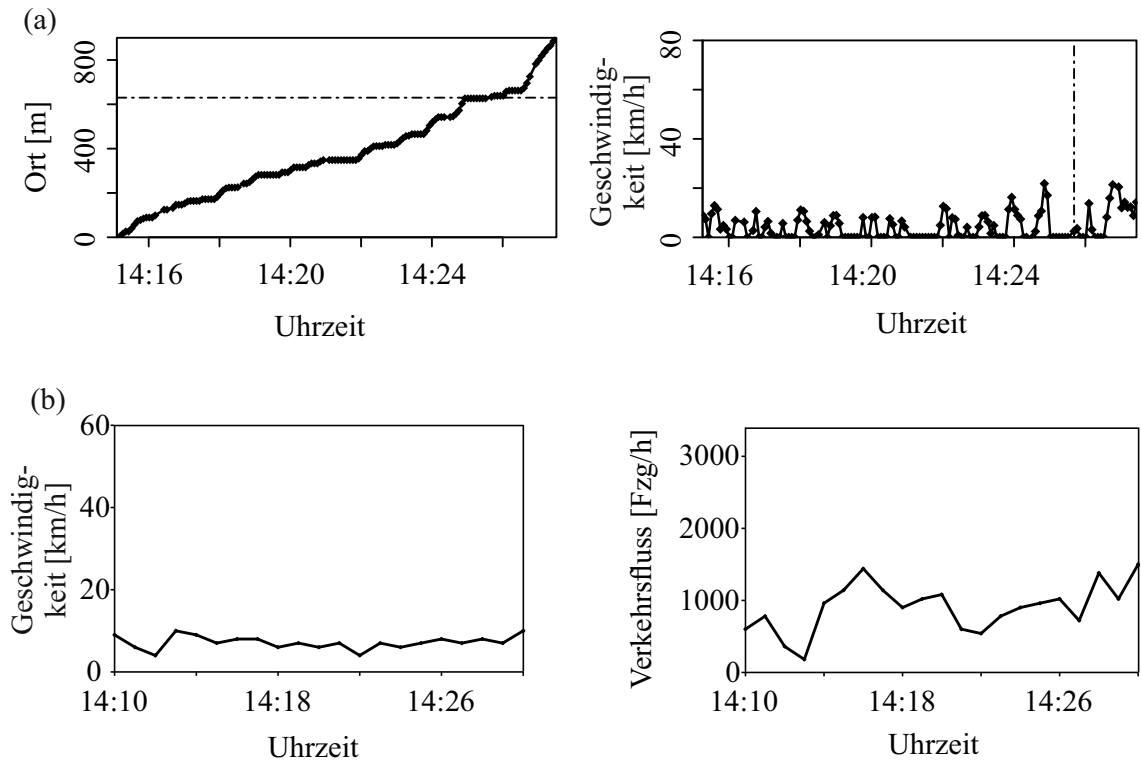


Abbildung 4.33: Empirische Mega-Queue, beobachtet am 2. Februar 2013 auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1). (a) Einzelfahrzeugtrajektorie aus anonymisierten empirischen GPS-Daten (links) und Geschwindigkeit entlang dieser Trajektorie (rechts), (b) mittlere Geschwindigkeit (links) und Verkehrsfluss (rechts). Die Messwerte aus (b) stammen vom Detektor „DV“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktierten Linien in (a) markieren die Position der LSA (links) bzw. den zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

Ein weiteres Beispiel für eine Fahrzeugtrajektorie in einer empirischen Mega-Queue ist zusammen mit dem dazugehörigen zeitlichen Geschwindigkeitsverlauf in Abb. 4.34 (a) gezeigt. Auch hier besteht der Trajektorienverlauf aus einer Abfolge von Stillständen

unterschiedlicher Dauern und kurzen Fahrtstrecken. Entlang der Trajektorie gibt es mehr GPS-Messwerte, wo das Fahrzeug zum Zeitpunkt der Messung stillsteht, als Messwerte, bei denen es sich fortbewegt. Die Reisezeit entlang des betrachteten Streckenabschnittes der Völklinger Straße beträgt auch hier mehr als 10 Minuten.

In den Detektordaten, die in Abb. 4.34 (b) gezeigt sind, sieht man, dass die mittlere Geschwindigkeit am Detektor um den Wert 10 km/h schwankt und diesen mehrfach unterschreitet. In mehreren Minuten werden Verkehrsflüsse unter 1000 Fahrzeugen/h über beide Spuren gemessen, besonders auffällig ist dabei die Folge niedriger Verkehrsflüsse von 16:43 Uhr bis 16:47 Uhr.

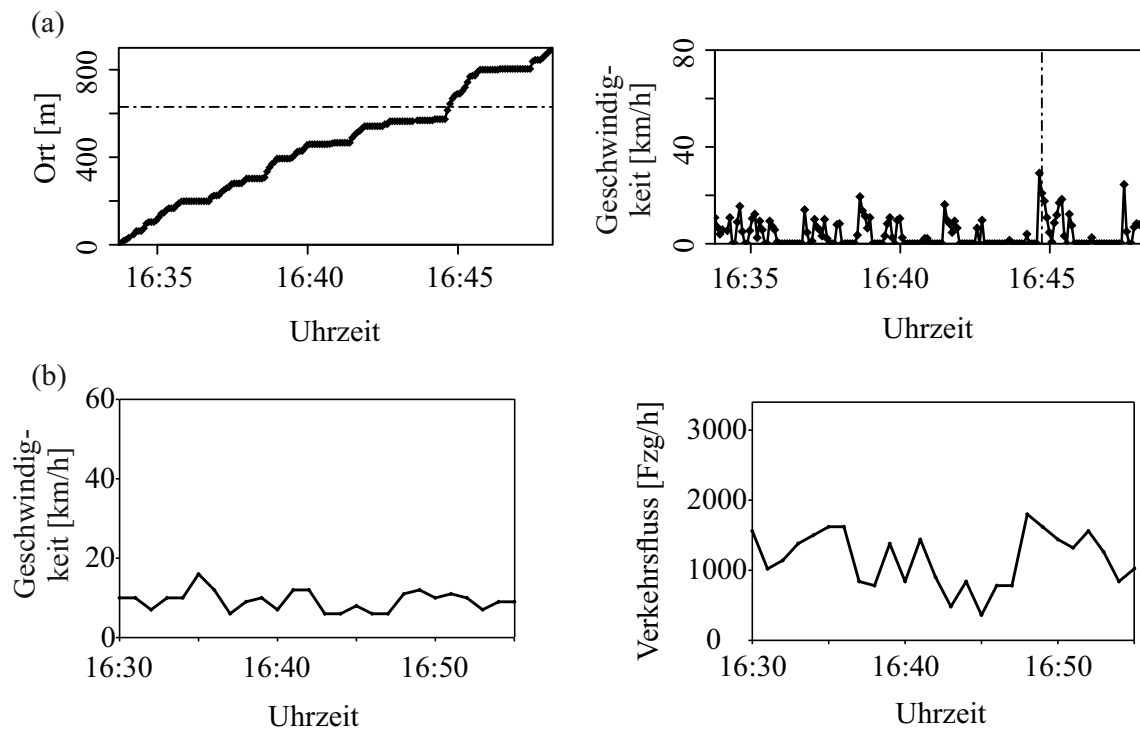


Abbildung 4.34: Empirische Mega-Queue, beobachtet am 5. Februar 2013 auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1). (a) Einzelfahrzeugtrajektorie aus anonymisierten empirischen GPS-Daten (links) und Geschwindigkeit entlang dieser Trajektorie (rechts), (b) mittlere Geschwindigkeit (links) und Verkehrsfluss (rechts). Die Messwerte aus (b) stammen vom Detektor „DV“ (vgl. Abb. 3.1). Die strichpunktierten Linien in (a) markieren die Position der LSA (links) bzw. den zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA (rechts).

4 Empirische mikroskopische Eigenschaften des übersättigten innerstädtischen Verkehrs

Für die Zeiträume, in denen die Trajektorien aus den Abbildungen 4.33 und 4.34 gemessen wurden, sind in Tabelle 4.1 die Minima, Maxima und Mittelwerte von mittlerer Geschwindigkeit und Verkehrsfluss am Detektor gezeigt. Ein Vergleich mit den Tabellen 3.1 und 3.2, in denen mittlere Geschwindigkeiten und Verkehrsflüsse nach Einbruch der Geschwindigkeit aufgelistet sind, macht deutlich, dass die mittleren Geschwindigkeiten und Verkehrsflüsse, die während des Auftretens einer Mega-Queue gemessen werden, deutlich unter den durchschnittlichen mittleren Geschwindigkeiten und Verkehrsflüssen im übersättigten Verkehr nach Einbruch der Geschwindigkeit liegen.

Tabelle 4.1: Minima, Maxima und zeitliche Mittelwerte („avg“) von mittlerer Geschwindigkeit v und Verkehrsfluss q am Detektor „DV“ zu den Zeiträumen der Fahrzeugtrajektorien aus den Abbildungen 4.33 und 4.34.

Abbildung	(a)	(b)
Datum	4.33	4.34
Zeitraum	14:15–14:26 Uhr	16:33–16:45 Uhr
v_{\min} [km/h]	4	6
v_{\max} [km/h]	8	12
v_{avg} [km/h]	7	10
q_{\min} [Fzg/h]	540	360
q_{\max} [Fzg/h]	1440	1620
q_{avg} [Fzg/h]	960	1080

Um die Ausbreitung einer empirischen Mega-Queue in Raum und Zeit zu untersuchen, kehren wir zum in 3.3.2 diskutierten Beispiel eines Einbruchs von Geschwindigkeit und Verkehrsfluss auf der „Völklinger Straße“ zurück (erneut gezeigt in Abb. 4.36 (b),(c)). Dieser Einbruch wurde durch eine Straßensperrung nach einem Verkehrsunfall verursacht. Trajektorien von Fahrzeugen, die während dieses Einbruches auf dem betreffenden Streckenabschnitt gemessen wurden, sind in Abb. 4.35 (a) gezeigt. Anhand der Trajektorien 1–3 lässt sich die Ausbreitung einer Mega-Queue in stromaufwärtiger Richtung verfolgen: Das Fahrzeug 1 steht erstmals am Ort $x = 280$ m relativ zum Streckenbeginn, Fahrzeugtrajektorie 2 zeigt am Ort $x = 180$ m den ersten Stillstand, und Trajektorie 3 am Ort $x = 140$ m. Der Schnitt der Trajektorien 2 und 3 zeigt, dass sich die entsprechenden Fahrzeuge im stromabwärtigen Teil des Streckenabschnittes auf verschiedenen Spuren bewegen. Trajektorien 4–6 zeigen, dass ab 9:54 Uhr keine Mega-Queue mehr zu beobachten ist, sondern dieselben Verkehrsmuster wie im übersättigten Verkehr nach Einbruch der Geschwindigkeit: In den Trajektorien 4 und 5 ist Synchronisierter Verkehr erkennbar, und Trajektorie 6 zeigt mehrere Stillstände in Moving Queues.

Die zeitlichen Geschwindigkeitsverläufe entlang der Trajektorien 1 und 2 aus Abb. 4.35 (a) sind in den Teilabbildungen (b) und (c) von Abb. 4.35 gezeigt. In Teilabbildung (b) erkennt man, wie sich das Fahrzeug zunächst mit Geschwindigkeiten zwischen 40 km/h und 50 km/h fortbewegt, bevor es auf die Verkehrsstörung trifft. Danach nehmen lange Stillstände einen großen Teil der Reisezeit ein, die trotz der anfänglich schnellen Fortbewegung länger als fünf Minuten ist. Im Geschwindigkeitsverlauf entlang Trajektorie 2 aus Teilabbildung (c) ist in den ersten 20 Sekunden zu erkennen, wie das Fahrzeug aufgrund der Verkehrsstörung verzögert. Anschließend ist der Geschwindigkeitsverlauf zwischen 9:46 Uhr und 9:49 Uhr, ähnlich wie bei Trajektorie 1, durch lange Stillstände gekennzeichnet.

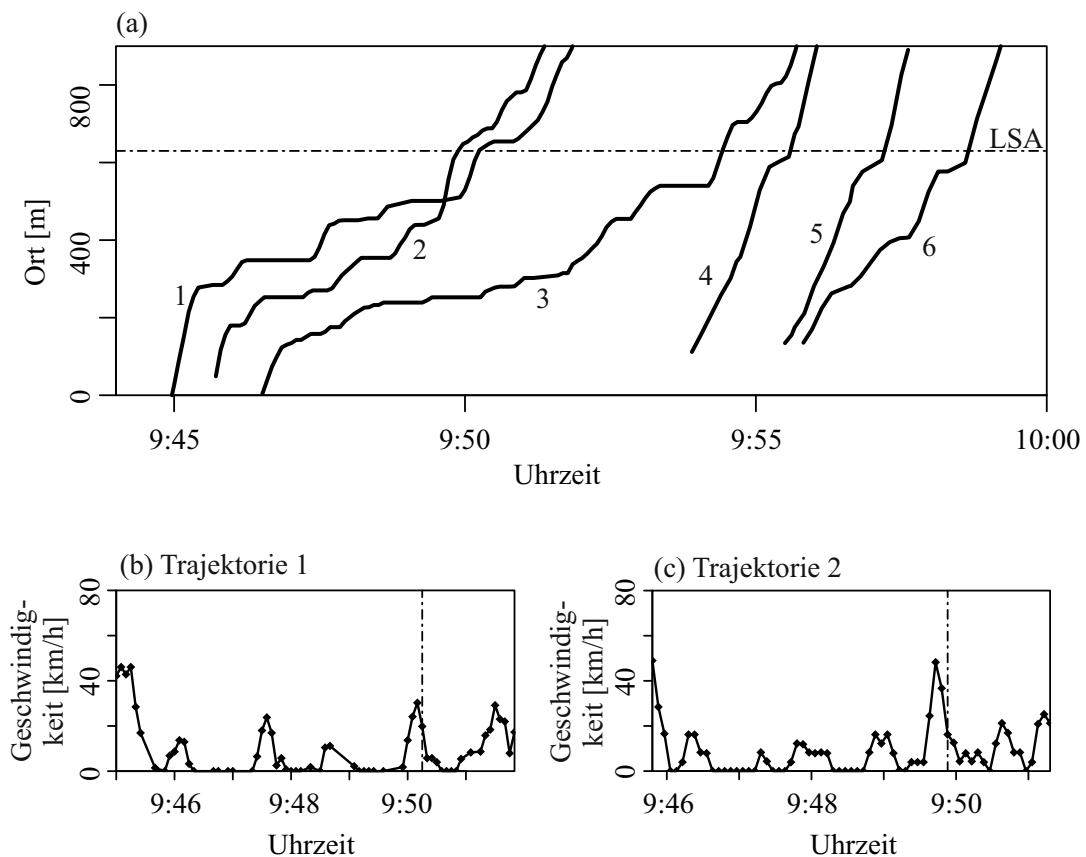


Abbildung 4.35: Ausschnitt eines räumlich-zeitlichen Verkehrsmusters, gemessen auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (Abb. 3.1) am 10. April 2013 (I): (a) Fahrzeugtrajektorien in Weg und Zeit aus anonymisierten empirischen GPS-Daten. (b),(c) Mikroskopische Geschwindigkeiten entlang der Trajektorien 1 und 2 aus (a). Die strichpunktierten Linien markieren in (a) den Ort der LSA bzw. in (b),(c) den zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA.

Der Geschwindigkeitsverlauf entlang Trajektorie 3 aus Abb. 4.35 ist in Abb. 4.36 (a) gezeigt. Das entsprechende Fahrzeug begegnet der Verkehrsstörung entlang des gesamten Streckenabschnittes. Besonders auffällig ist der Zeitraum von 9:47 Uhr bis 9:50 Uhr, in dem sich das Fahrzeug zwischen langen Stillständen nur kurzzeitig fortbewegt. In diesem Zeitraum zeigt die Trajektorie den typischen Fahrtverlauf einer empirischen Mega-Queue, qualitativ den Beispielen aus den Abbildungen 4.33 und 4.34 entsprechend.

Der Einbruch von mittlerer Geschwindigkeit und Verkehrsfluss am Detektor am Streckenbeginn ab 9:47 Uhr in den Abb. 4.36 (b),(c) zeigt, dass die Mega-Queue sich über den gesamten Streckenabschnitt ausgebreitet hat. Um 9:54 Uhr erholt sich der Verkehrsfluss, die mittlere Geschwindigkeit am Detektor bleibt aber weiterhin niedrig.

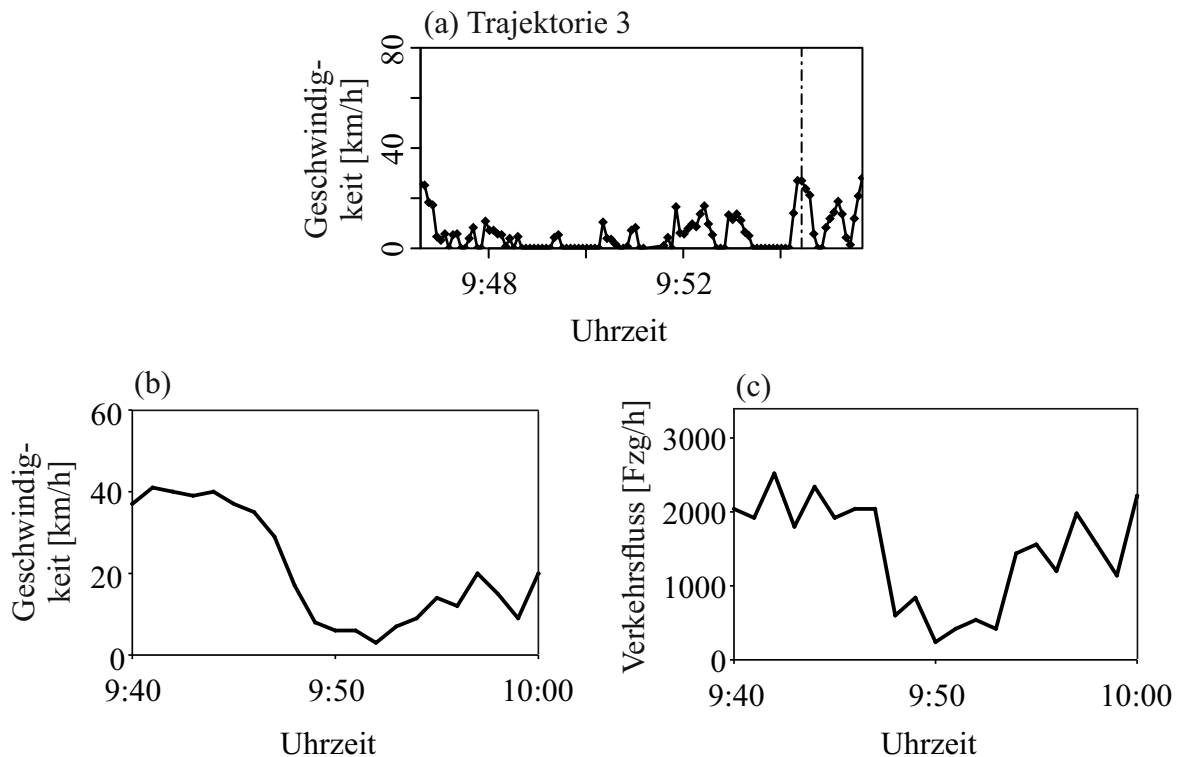


Abbildung 4.36: Ausschnitt eines räumlich-zeitlichen Verkehrsmusters, gemessen auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (Abb. 3.1) am 10. April 2013 (II): (a) Mikroskopische Geschwindigkeit entlang der Trajektorie 3 aus Abb. 4.35 (a). Die strichpunktierte Linie markiert den zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA. (b),(c) Mittlere Geschwindigkeit und Fluss, gemessen mit dem Detektor „DV“ aus Abb. 3.1. (b),(c) wurden auch in Abb. 3.13 gezeigt.

4.3 Zusammenfassung und Diskussion

Es wurden anonymisierte GPS-Daten aus Navigationsgeräten untersucht, die in den Jahren 2011, 2013 und 2014 auf drei Streckenabschnitten mit Navigationsgeräten in Fahrzeugen gemessen wurden. Bei dieser Analyse konnten typische Eigenschaften und Verkehrsmuster des übersättigten Verkehrs auf innerstädtischen Straßen identifiziert werden.

Empirische Verkehrsmuster nach Einbruch der Geschwindigkeit

Im übersättigten Verkehr nach Einbruch der Geschwindigkeit konnten die folgenden Verkehrsmuster und Phänomene gefunden werden:

- Regelmäßige Folgen von Moving Queues.
- Strukturen des Synchronisierten Verkehrs.
- Mischungen von Moving Queues und Synchronisiertem Verkehr, in denen ein Fahrzeug entlang eines Streckenabschnittes an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeitpunkten Moving Queues und Synchronisierten Verkehr antrifft.
- Zufällige räumlich-zeitliche Übergänge zwischen Folgen von Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs.
- Gleichzeitiges Auftreten von Moving Queues und Synchronisiertem Verkehr auf verschiedenen Spuren.

Diese empirischen Ergebnisse belegen, dass neben den Moving Queues, die in der klassischen Theorie zur Beschreibung des übersättigten Verkehrs verwendet werden, auch Synchronisierter Verkehr ein typisches Verkehrsmuster des übersättigten Verkehrs nach Einbruch der Geschwindigkeit ist. Quantitativ unterscheiden sich diese Verkehrsmuster dadurch, dass die betragsmäßigen Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen aufeinanderfolgenden GPS-Messungen entlang Fahrzeugtrajektorien in Folgen von Moving Queues größer sind, ebenso die Standardabweichungen dieser Geschwindigkeitsdifferenzen. Eine Abhängigkeit des Auftretens der verschiedenen Muster vom Verkehrsfluss auf dem entsprechenden Streckenabschnitt ist anhand der untersuchten Daten nicht nachweisbar.

Wie in Abschnitt 2.2.3 diskutiert, ist die Entstehung von Synchronisiertem Verkehr im übersättigten Verkehr von Kerner *et al.* anhand numerischer Simulationen vorhergesagt worden [22]. Demnach lösen sich Moving Queues während ihrer Bewegung in stromaufwärtiger Richtung auf und gehen in Synchronisierten Verkehr über. Anstatt in einer Folge von Moving Queues regelmäßig stillzustehen, halten die Fahrzeuge in den Simulationen nur einmal oder zweimal in der Nähe der Lichtsignalanlage an. Vor diesen Stillständen in Moving Queues durchfahren sie Synchronisierten Verkehr, wobei sie mehrfach beschleunigen und verzögern. Diese theoretischen Ergebnisse können durch die empirische Untersuchung der vorliegenden Arbeit bestätigt werden: Einige empirische

Beispiele zeigen, dass Fahrzeuge in der Nähe der Lichtsignalanlage einmal oder zweimal in Moving Queues stillstehen, nachdem sie stromaufwärts der Orte dieser Stillstände zuvor Synchronisierten Verkehr durchfahren haben. Auch zeigen die empirischen Ergebnisse, dass Fahrzeuge beim Durchfahren von Synchronisiertem Verkehr häufig beschleunigen und verzögern.

Bei den Rahmenbedingungen in Simulation und Testfeldern gibt es einige Unterschiede: So werden in der Simulation offene Randbedingungen benutzt. Bei den realen betrachteten Streckenabschnitten dagegen haben die Kreuzungsbereiche eine komplexe Geometrie mit Auffächerungen und Möglichkeiten zum Abbiegen. Außerdem fahren die Fahrzeuge in der Simulation nach Passieren der Lichtsignalanlage im freien Verkehr weiter, wogegen im realen Verkehr auch stromabwärts der Lichtsignalanlage in manchen Fällen Verkehrsstörungen beobachtet wurden. Trotz der genannten unterschiedlichen Bedingungen in Simulation und Testfeldern konnten die im vorigen Absatz genannten Phänomene, welche durch die Simulationen vorhergesagt wurden, empirisch verifiziert werden. Dies gilt, obwohl diese Phänomene bereits in Simulationen einspuriger Straßen auftreten, wohingegen auf den empirisch untersuchten mehrspurigen Streckenabschnitten Spurwechsel auftreten können.

Auf der Grundlage der Kerner'schen Drei-Phasen-Theorie wird die Auflösung von Moving Queues und die Entstehung von Synchronisiertem Verkehr flussaufwärts der Moving Queues anhand der Art der Geschwindigkeitsanpassung erklärt ([22], vgl. die Abschnitte 2.1.5 und 2.2.3): Bei frühzeitiger Geschwindigkeitsanpassung lösen sich die Moving Queues bereits wenige hundert Meter stromaufwärts der Lichtsignalanlage auf. Bei „normaler“ Geschwindigkeitsanpassung bewegen sich Moving Queues dagegen in stromaufwärtiger Richtung im übersättigten Verkehr fort, ohne dass sie sich auflösen oder ihre mittlere Länge geringer wird. In der Simulation wird die Art der Geschwindigkeitsanpassung mittels eines Koeffizienten ϵ kontrolliert. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung von Floating-Car-Daten sind derartige Kontrollmöglichkeiten für die Geschwindigkeitsanpassung natürlich nicht gegeben. Im realen übersättigten Verkehr nach Einbruch der Geschwindigkeit wechseln sich Moving Queues und Synchronisierter Verkehr zufällig in der Zeit ab und gehen ineinander über. Es ist vernünftig anzunehmen, dass verschiedene Arten der Geschwindigkeitsanpassung unter den Fahrern, die einen Streckenabschnitt passieren, zufällig verteilt sind und sich diese Verteilung in der Zeit zufällig ändert.

Empirische Mega-Queue

Werden am stationären Detektor neben niedrigen Geschwindigkeiten auch niedrige Verkehrsflüsse gemessen, so zeigen sich in den anonymisierten empirischen GPS-Daten Phänomene, die sich deutlich vom übersättigten Verkehr nach Einbruch der Geschwindigkeit unterscheiden. Es lassen sich Mega-Queues beobachten mit den folgenden Eigenschaften:

- Deutlich geringere mittlere Geschwindigkeiten als im übersättigten Verkehr nach Einbruch der Geschwindigkeit.
- Unterdrückung der Bildung von Synchronisiertem Verkehr.

- Unregelmäßiges Abwechseln von Stillstand und Fahrt mit geringer Geschwindigkeit entlang einer Fahrzeugtrajektorie.
- Deutliche Unterschiede der Dauern einzelner Stillstände entlang einer Fahrzeugtrajektorie.

Die genannten Eigenschaften der empirischen Mega-Queue entsprechen phänomenologisch dem Mega-Jam, der in Kerners Theorie des gestauten Verkehrs an starken Engstellen auf Schnellstraßen beschrieben wird ([21], vgl. Abschnitt 2.1.8): Die Fortbewegung der Fahrzeuge mit geringer Geschwindigkeit lässt sich durch Moving Blanks erklären, und wenn die Fahrzeuge stillstehen, ist der Verkehrsfluss unterbrochen. Die zeitlich-räumliche Unregelmäßigkeit, mit der Fahrzeuge zwischen Stillstand und Fortbewegung mit geringer Geschwindigkeit in empirischen Mega-Queues wechseln, ähnelt qualitativ der komplexen zeitlichen Abfolge von Moving Blanks und Unterbrechungen des Flusses des theoretisch beschriebenen Mega-Jams.

5 Energieeffizienz von Fahrzeugen im übersättigten innerstädtischen Verkehr

In Kapitel 4 wurde gezeigt, dass übersättigter Verkehr nach Geschwindigkeitseinbruch aus Moving Queues und Synchronisiertem Verkehr besteht. Diese beiden Verkehrsmuster unterscheiden sich deutlich in Bezug auf das Beschleunigungsverhalten von Fahrzeugen: In einer Folge von Moving Queues beschleunigt ein Fahrzeug beim Verlassen der einzelnen Warteschlangen mehrmals aus dem Stillstand. Im Synchronisierten Verkehr dagegen treten derartige Beschleunigungsvorgänge aus dem Stillstand nicht auf. Da das Beschleunigungsverhalten für die Energieeffizienz von Fahrzeugen von entscheidender Bedeutung ist, liegt die Vermutung nahe, dass die Energieeffizienz im übersättigten Verkehr vom Verkehrsmuster abhängt. Diese Abhängigkeit der Energieeffizienz vom Verkehrsmuster soll in diesem Kapitel untersucht werden.

Die mikroskopische Beschleunigung entlang einer Fahrzeugtrajektorie wird von Navigationsgeräten im Allgemeinen nicht gemessen und kann aus anonymisierten GPS-Daten, wie sie in der empirischen Untersuchung von Kapitel 4 betrachtet wurden, nicht bestimmt werden. Daher benutzen wir eine makroskopische Kenngröße, welche die Beschleunigung beschreibt: Die *Kumulierte Beschleunigung*. Diese Kenngröße lässt sich für GPS-Daten aus Navigationsgeräten berechnen.

Der Begriff „Energieeffizienz von Fahrzeugen“ bezieht sich in der vorliegenden Arbeit sowohl auf Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor als auch auf Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor wird die Energieeffizienz durch den Kraftstoffverbrauch abgebildet. Im Fall von Elektrofahrzeugen wird die Energieeffizienz durch die elektrische Energie der Batterie abgebildet. Hierbei ist sowohl die vom Elektromotor umgewandelte als auch die durch Rekuperation an die Batterie zurückgeführte Energie zu berücksichtigen. Verbrauch und Rekuperation werden in der vorliegenden Arbeit durch den Begriff „Energiebilanz“ zusammengefasst.

Die Energieeffizienz von Fahrzeugen hängt von verschiedenen Aspekten ab, die das Fahrzeug (z.B. Motorleistung, Masse, Betriebstemperatur), die befahrene Straße (z.B. Steigung, Straßenbelag) oder den Fahrer (Fahrverhalten) betreffen. Die vorliegende Arbeit behandelt nur den Zusammenhang zwischen Verkehr und Energieeffizienz.

5.1 Grundlagen

5.1.1 Empirische mikroskopische Verbrauchsmatrix

Mikroskopisch hängt für ein gegebenes Fahrzeug mit einem festen Satz von Fahrzeugparametern die Energiebilanz entlang einer Strecke von den zeitlichen Verläufen der Geschwindigkeit und der Beschleunigung des Fahrzeugs ab. Zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Beschleunigung existieren einige Modelle [19, 58, 59]. In diesen Modellen wird der Verbrauch in Abhängigkeit von Leistung, Wirkungsgrad und Drehzahl ausgedrückt. Während die Leistung direkt in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Beschleunigung (und gegebenenfalls die Steigung der Straße) ausgedrückt werden kann, werden Motorkennfelder benötigt, um Geschwindigkeit und Beschleunigung mit Wirkungsgrad und Drehzahl in Beziehung bringen zu können. Dabei muss die Gangwahl mithilfe eines Fahrermodells nachgebildet werden [19]. Eine modellbasierte Untersuchung des Energieverbrauchs von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb ist in [60] beschrieben.

Alternativ zum oben beschriebenen modellbasierten Ansatz kann die Abhängigkeit des Verbrauchs von Fahrzeuggeschwindigkeit und Fahrzeugbeschleunigung auch *empirisch* bestimmt werden. Zu diesem Zweck wertete Koller reale Daten aus einem Feldversuch aus [49]. Bei diesem Feldversuch wurden Geschwindigkeit, Beschleunigung und Verbrauch im Fahrzeug gemessen und über den CAN-Datenbus (*Controller Area Network*, [61]) mehrfach pro Sekunde aufgezeichnet und gespeichert (vgl. Abb. 5.1). Für jede gefahrene Sekunde bildete Koller zu jeder der drei Messgrößen den Median über alle Werte. So wurde eine Menge von Wertetripeln aus Geschwindigkeit, Beschleunigung und Verbrauch aggregiert.

Mit der Menge von Wertetripeln bildete Koller *empirische mikroskopische Verbrauchsmatrizen* [49]. Gemäß den zugehörigen Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerten wurden die Verbrauchswerte Matrixelementen zugeordnet. Dabei wurden Geschwindigkeiten in Intervalle der Breite 2 km/h und Beschleunigungen in Intervalle der Breite 0,1 m/s² aggregiert. Über alle Verbrauchswerte, deren zugehörige Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte im selben Aggregierungsintervall liegen, wurde für jedes Matrixelement der Median gebildet.

Eine empirische mikroskopische Verbrauchsmatrix für ein Mittelklasse-Fahrzeug ist in Abb. 5.2 gezeigt [49]. In diese Matrix gingen Werte aus 90 Stunden Fahrtzeit ein, verteilt auf 20 Tage. Dabei handelt es sich um mehr als 10 Millionen Datenpunkte. An den verschiedenen Tagen des Feldversuchs wurde das Fahrzeug von mehreren Fahrern auf verschiedenen Strecken in Deutschland gefahren, wobei es sich sowohl um innerstädtische Straßen als auch um Autobahnen handelte. Die Aggregation eines jeden Matrixelementes umfasst also verschiedene Eigenschaften der Straßen wie z.B. Steigungen, sowie das verschiedenartige Fahrverhalten unterschiedlicher Fahrer. Für empirische Untersuchungen des expliziten Zusammenhangs zwischen Steigungen und Kraftstoffverbrauch verweisen wir auf Frey *et al.* [62] und Boriboonsomsin *et al.* [63].

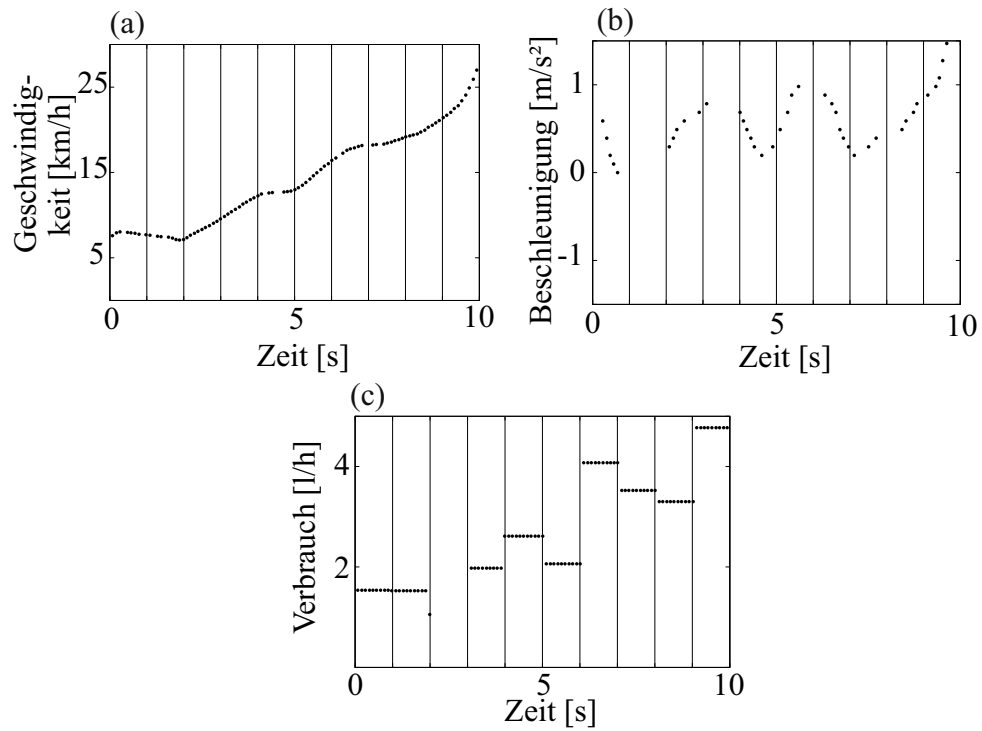


Abbildung 5.1: Empirische CAN-Bus-Daten aus einem Fahrzeug in einem Feldversuch: (a) Geschwindigkeit, (b) Beschleunigung, (c) Kraftstoffverbrauch [49].

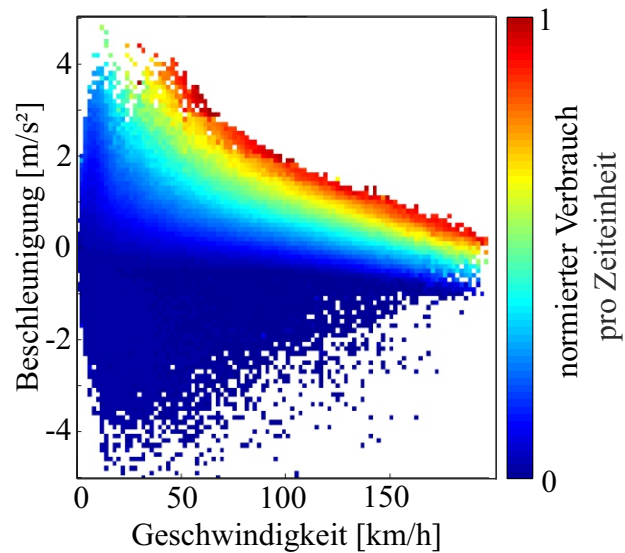


Abbildung 5.2: Farbcodierte Darstellung einer empirischen mikroskopischen Verbrauchsmatrix eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor [49].

5 Energieeffizienz von Fahrzeugen im übersättigten innerstädtischen Verkehr

Für ein Fahrzeug mit elektrischem Antrieb (Smart Electric Drive) sind in Testfahrten die Geschwindigkeit sowie die elektrische Stromstärke und Spannung an der Fahrzeugbatterie über den CAN-Bus gemessen worden [64]. Auch diese Feldversuchsdaten wurden mit derselben Vorgehensweise wie im Fall des Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor zu einer empirischen mikroskopischen Energieeffizienzmatrix aggregiert. Im Fall des Elektrofahrzeugs liegen der Matrix allerdings nur etwa 146 000 Datenpunkte zugrunde. Außerdem wurde bei den Testfahrten die Beschleunigung nicht gemessen und musste für die Matrix aus der Geschwindigkeit abgeleitet werden. Die Breiten der Aggregationsintervalle sind 2 km/h für die Geschwindigkeit (wie beim Verbrenner) und $0,278 \text{ m/s}^2$ für die Beschleunigung. Letzterer Wert ergibt sich aus der Genauigkeit der Ableitung der Beschleunigung aus der Geschwindigkeit: 1 km/h pro Sekunde ist kleinste Geschwindigkeitsänderung im Rahmen der Messgenauigkeit.

Eine farbcodierte Darstellung der empirischen mikroskopischen Matrix für das Elektrofahrzeug ist in Abb. 5.3 dargestellt. Neben positiven Werten, die dem Verbrauch elektrischer Energie entsprechen, gibt es für negative Beschleunigungen in einigen Matrixelementen aufgrund der Rekuperation auch negative Einträge.

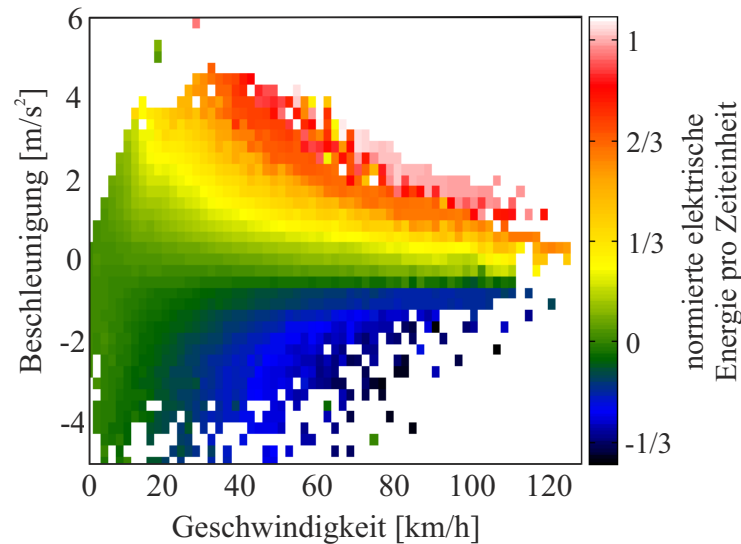


Abbildung 5.3: Farbcodierte Darstellung einer empirischen mikroskopischen Energiematrix eines Fahrzeugs mit elektrischem Antrieb [64].

Relativer Verbrauch in Abhängigkeit gleichbleibender Geschwindigkeit

Zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs eines Fahrzeugs (und analog der Energiebilanz) entlang einer Fahrtstrecke werden Zeitreihen v_1, \dots, v_N und a_1, \dots, a_N der Geschwindigkeit und Beschleunigung entlang der Fahrzeugtrajektorie als Eingangsgrößen für die empirischen mikroskopischen Energiematrizen (Abbildungen 5.2 bzw. 5.3) benötigt [65–67]. Für jeden Zeitschritt n kann dann der instantane Verbrauchswert c_n , gemäß dem Wertepaar (v_n, a_n) in

der Matrix nachgeschlagen werden. Der Gesamtverbrauch $C_{k,j}$ entlang Fahrzeugtrajektorie k auf Straßenabschnitt j ergibt sich durch Aufsummieren der instantanen Verbrauchswerte aller Zeitschritte [65–67],

$$C_{k,j} = \sum_{n=1}^N c_n. \quad (5.1)$$

Mit Gl. (5.1) kann der *relative Verbrauch* $C_{\text{rel};k,j}$ entlang Trajektorie k auf Straßenabschnitt j als [65–67]

$$C_{\text{rel};k,j} = \frac{C_{k,j}}{C_{I,j}} \quad (5.2)$$

geschrieben werden. In Gl. (5.2) bezeichnet $C_{I,j}$ den Verbrauch entlang einer hypothetischen Fahrzeugtrajektorie mit zeitunabhängiger Geschwindigkeit von 60 km/h auf einem Streckenabschnitt derselben Länge wie j . Die Wahl von $C_{I,j}$ als Einheit für den relativen Verbrauch begründet sich darin, dass es idealen innerstädtischen Verkehrsbedingungen einer „perfekten grünen Welle“ entspricht. Größere Werte als 1 drücken somit einen durch Verkehrsstörungen erhöhten Verbrauch aus.

Als Test der Plausibilität der Verbrauchsmatrix für Verbrennerfahrzeuge wenden wir sie auf Fahrten auf einem Streckenabschnitt gegebener Länge mit zeitunabhängigen Geschwindigkeiten an [68]. Die resultierende Abhängigkeit des relativen Verbrauchs von der zeitunabhängigen Geschwindigkeit ist in Abb. 5.4 gezeigt. Qualitativ entspricht sie den aus der Literatur bekannten Ergebnissen [69]: Zwischen 40 km/h und 80 km/h zeigt sich ein breites Verbrauchsminimum. Sowohl für niedrige Geschwindigkeiten unter 20 km/h als auch für Geschwindigkeiten über 100 km/h ist der Anstieg des Verbrauchs deutlich erkennbar.

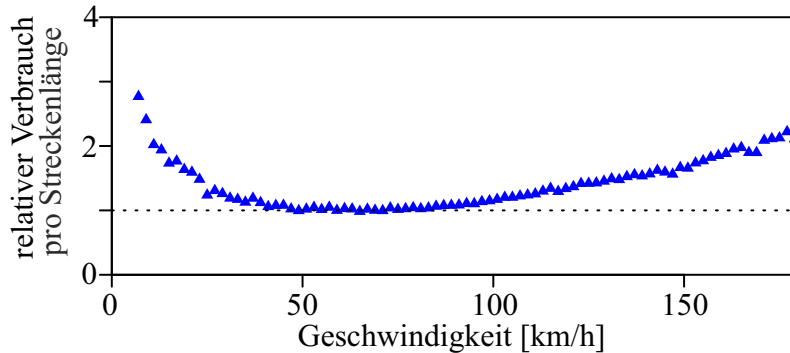


Abbildung 5.4: Relativer Verbrauch in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bei Fahrten mit zeitunabhängiger Geschwindigkeit auf einer Wegstrecke fester Länge, berechnet mit der mikroskopischen Verbrauchsmatrix eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor (Abb. 5.2) [65–67]. Der Verlauf entspricht qualitativ den aus der Literatur bekannten Ergebnissen [69]. Abgewandelt von [68].

5 Energieeffizienz von Fahrzeugen im übersättigten innerstädtischen Verkehr

Die entsprechende Abhängigkeit des Verbrauchs elektrischer Energie von der zeitunabhängigen Geschwindigkeit für ein Fahrzeug mit elektrischem Antrieb, basierend auf der mikroskopischen Energiematrix aus Abb. 5.3, ist in Abb. 5.5 gezeigt. Wie beim Verbrennerfahrzeug ist ein breites Minimum zu erkennen, das sich in diesem Fall von 20 km/h bis 80 km/h erstreckt. Unterhalb 20 km/h steigt die relative elektrische Energie an, allerdings schwächer als der relative Verbrauch des Verbrennerfahrzeugs. Deutlich erkennbar ist die Schwankung der Werte der relativen elektrischen Energie, insbesondere im Bereich des breiten Minimums. Als Grund für dieses Rauschen kann die Messungenauigkeit herangezogen werden sowie die zuvor erwähnte Tatsache, dass für die Aggregation der empirischen mikroskopischen Matrix des Elektrofahrzeugs deutlich weniger Messwerte zur Verfügung standen als im Fall des Verbrennerfahrzeugs.

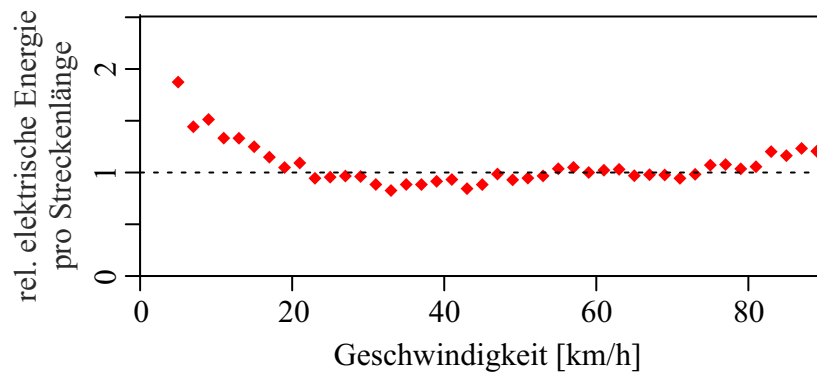


Abbildung 5.5: Relative elektrische Energie in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bei Fahrten mit zeitunabhängiger Geschwindigkeit auf einer Wegstrecke fester Länge, berechnet mit der mikroskopischen Energiematrix eines Fahrzeugs mit elektrischem Antrieb (Abb. 5.3).

5.1.2 Kumulierte Beschleunigung

Die Auswertung von anonymisierten GPS-Daten in Kapitel 4 hat deutliche qualitative Unterschiede der Geschwindigkeitsverläufe von Fahrzeugen in Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs gezeigt: Während Fahrzeuge nach Stillständen in Moving Queues von null beschleunigen, gibt es in Strukturen des Synchronisierten Verkehrs keine Stillstände. Da die Energieeffizienz von Fahrzeugen, d.h. der Kraftstoffverbrauch bzw. die Energiebilanz während einer Fahrt, von der Beschleunigung abhängt (vgl. Abschnitt 5.1.1), ist es interessant, die Auswirkung der verschiedenen Verkehrsmuster des übersättigten Verkehrs auf die Energieeffizienz von Fahrzeugen zu untersuchen.

Die Beschleunigung eines Fahrzeugs kann sich in einer Skala der Größenordnung von einer Sekunde erheblich ändern [66]. Dies zeigt der beispielhafte Ausschnitt eines realen Beschleunigungsverlaufs aus Abb. 5.6: Nach 5 Sekunden steigt die Beschleunigung an und fällt nach 6 Sekunden wieder ab. Solche Änderungen der Beschleunigung sind relevant

für den Verbrauch (vgl. die sekundlich gemessenen Verbräuche in den entsprechenden Sekunden in Abb. 5.1).

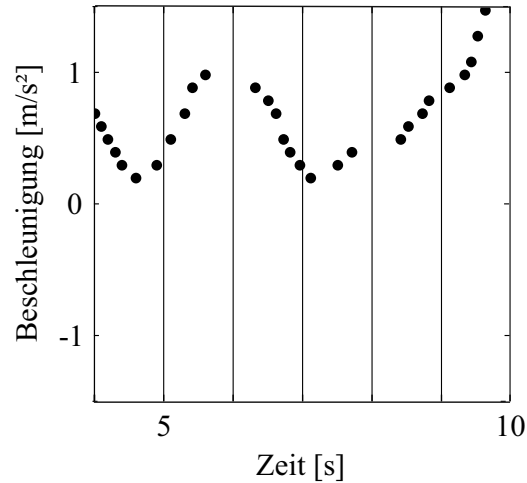


Abbildung 5.6: Realer Verlauf der Beschleunigung über der Zeit: 1 Sekunde kann als charakteristische Zeit für Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge angesehen werden. Empirische Daten aus einem Feldversuch vom CAN-Datenbus eines Testfahrzeugs. Ausschnitt von Abb. 5.1 (b), abgewandelt von [49].

Da anonymisierte empirische GPS-Daten aus Navigationsgeräten typischerweise in der zeitlichen Auflösung $\Delta t = 5$ s vorliegen und bei den vorhandenen Daten mit $\Delta t = 1$ s stark verrauscht sind (vgl. Abschnitt 3.4), können aus diesen Daten keine realistischen *mikroskopischen* Beschleunigungsverläufe abgeleitet werden.

Daher benutzen wir eine *makroskopische* Kenngröße, die den mikroskopischen Beschleunigungsverlauf repräsentiert [64–67]. Innerhalb der Messgenauigkeit sollte eine solche makroskopische Größe erfassen, wie oft und wie stark ein Fahrzeug erheblich beschleunigt. Informationen über diese erheblichen Beschleunigungsvorgänge sind in den Geschwindigkeitsdifferenzen $v_{n+1} - v_n$ zwischen aufeinanderfolgenden GPS-Messungen enthalten (vgl. Abb. 5.7). Die Beträge dieser Geschwindigkeitsdifferenzen sind bereits in Abschnitt 4.1.3 bei der Untersuchung physikalischer Eigenschaften von Verkehrsmustern untersucht worden. Zur Erhöhung des Kraftstoff- bzw. Energieverbrauchs eines Fahrzeug tragen insbesondere die positiven Beschleunigungsvorgänge bzw. Geschwindigkeitsdifferenzen bei. Aus diesem Grund verwenden wir die *Kumulierte Beschleunigung*, die auf der Basis dieser positiven Geschwindigkeitsdifferenzen definiert ist, als makroskopische Kenngröße für die Beschleunigung.

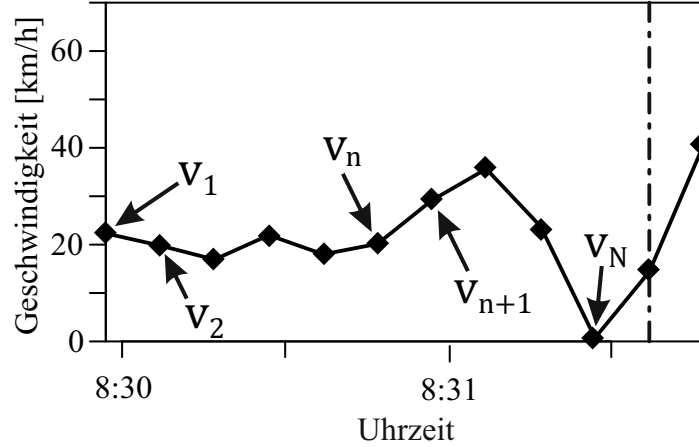


Abbildung 5.7: Zeitlicher Verlauf von Fahrzeuggeschwindigkeiten aus anonymisierten empirischen GPS-Daten als Eingangsdaten für die Berechnung der Kumulierten Fahrzeugbeschleunigung A_j pro Streckenlänge. Die strichpunktierte Linie bezeichnet den Zeitpunkt der ersten GPS-Messung, bei der sich das Fahrzeug nicht mehr auf dem Streckenabschnitt j befindet [70].

Die Kumulierte Beschleunigung A_j pro Streckenlänge L_j wurde 2014 von Kerner zur Abschätzung der Energieeffizienz von Fahrzeugen aus anonymisierten GPS-Daten zur Anwendung bei der Online-Berechnung energieeffizienter Routen eingeführt [70]. Für einen Streckenabschnitt j ist sie definiert durch die Formel [70]

$$A_j = \frac{1}{L_j} \sum_{n=1}^{N-1} (v_{n+1} - v_n) \theta_n. \quad (5.3)$$

Hierbei bezeichnet N die Anzahl von Zeitschritten, an denen sich das Fahrzeug auf der Strecke j befindet, und

$$\theta_n = \Theta[v_{n+1} - v_n - \Delta v], \quad (5.4)$$

mit der Heaviside-Funktion $\Theta[x]$. Die Verwendung von θ_n in Gl. (5.3) ist durch die intendierte Verwendung der Kumulierten Beschleunigung als Kennzahl für die Energiebilanz von Fahrzeugen begründet: positive Beschleunigungsvorgänge erhöhen den Verbrauch von Kraftstoff bzw. gespeicherter Energie. Zudem wählen wir $\Delta v > 0$, um den Einfluss des Fehlers, mit dem die Ableitung der Geschwindigkeit aus GPS-Messdaten behaftet ist, zu reduzieren. In dieser Arbeit wird für anonymisierte GPS-Daten mit $\Delta t = 5$ s stets $\Delta v = 0,5$ km/h verwendet.

Mit der Division durch L_j in Gl. (5.3) ist A_j unabhängig von der Länge des betreffenden Streckenabschnittes. Ferner wird für die Definition der Kumulierten Beschleunigung die Annahme getroffen, dass die Beschleunigung a_n zeitunabhängig zwischen aufeinanderfolgenden GPS-Messungen ist, also [70]

$$a_n = \frac{v_{n+1} - v_n}{\Delta t}. \quad (5.5)$$

Diese Annahme ist in Abb. 5.8 illustriert. Da bei der Anwendung von A_j ein gegebenes Δt vorausgesetzt wird, erscheint in Gl. (5.3), anders als bei der Beschleunigung, keine Division durch Δt . Die Kumulierte Beschleunigung A_j pro Streckenlänge hat als Dimension die reziproke Zeit, als Einheit wählen wir h^{-1} . Synonym zum Ausdruck „Kumulierte Beschleunigung A_j pro Streckenlänge“ verwenden wir als Kurzform auch „Kumulierte Beschleunigung“.

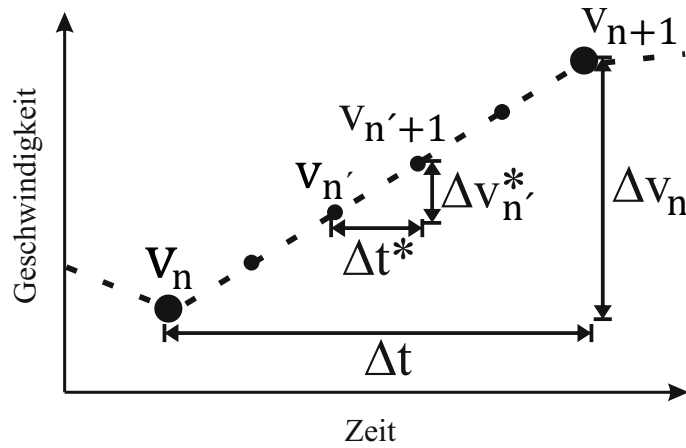


Abbildung 5.8: Illustration der Annahme der Zeitunabhängigkeit von der Fahrzeugbeschleunigung zwischen zwei GPS-Messungen [33].

Im Folgenden geben wir Zahlenwerte der Kumulierten Beschleunigung für idealisierte Beispiele von Fahrten auf einem Streckenabschnitt der Länge $L_j = 1 \text{ km}$ an (vgl. Abb. 5.9) [64, 66, 67]. Diese hypothetischen Fahrtverläufe sollen einen Eindruck von der Größenordnung der Kumulierten Beschleunigung in der Einheit h^{-1} vermitteln und beschreiben keine realen Verkehrsmuster oder Verkehrssituationen: Für eine Fahrt mit zeitunabhängiger Geschwindigkeit und zeitunabhängiger Beschleunigung von 0 m/s^2 ist auch die Kumulierte Beschleunigung gleich null. Beschleunigt ein Fahrzeug entlang einer Strecke von 1 km Länge einmal von 0 km/h auf 30 km/h , so ist $A_j = 30 \text{ h}^{-1}$. Finden entlang derselben Strecke sechs solcher Beschleunigungsvorgänge statt, so ergibt sich $A_j = 180 \text{ h}^{-1}$.

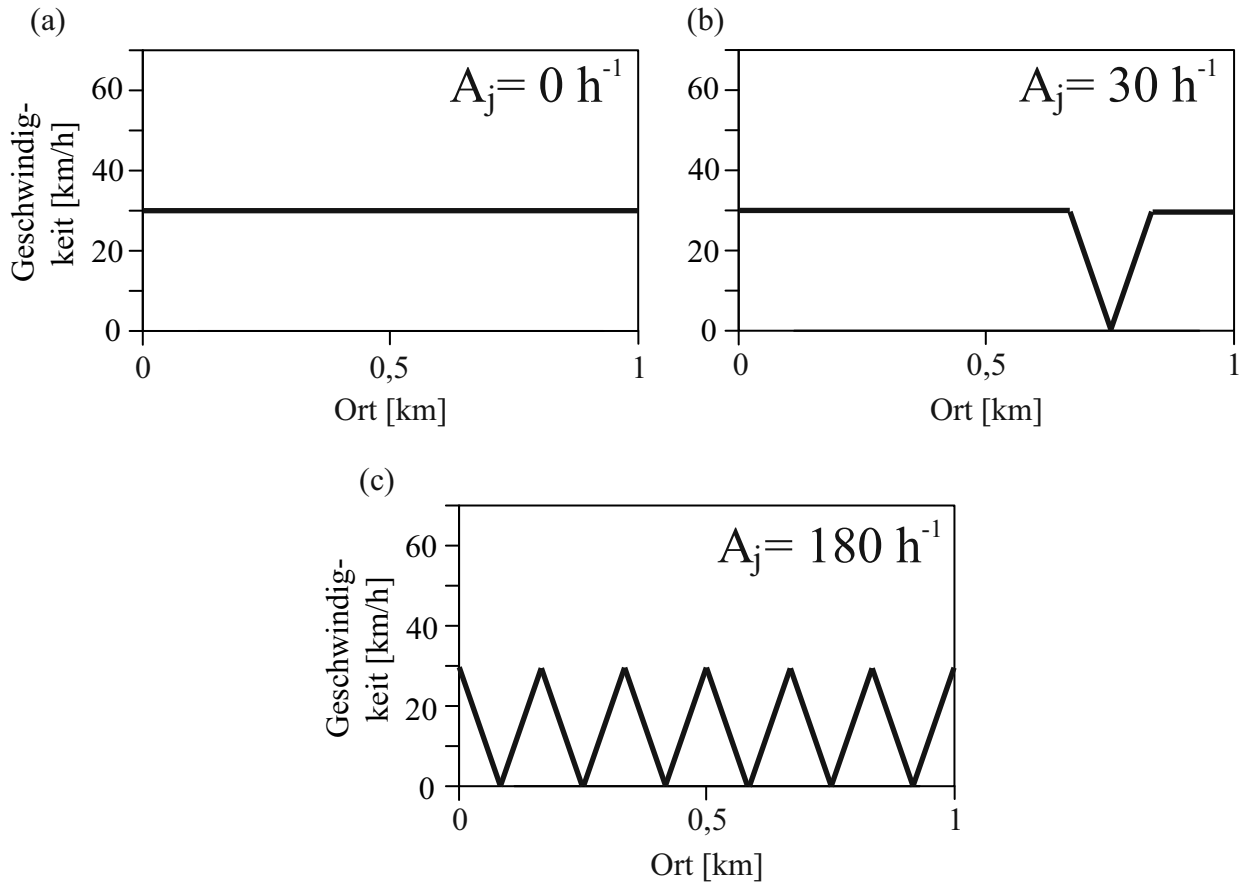


Abbildung 5.9: Geschwindigkeitsverläufe entlang idealisierter Fahrzeugtrajektorien auf einem Streckenabschnitt der Länge L_j mit unterschiedlichen Werten der Kumulierten Beschleunigung A_j pro Streckenabschnitt: (a) Fahrt mit zeitunabhängiger Geschwindigkeit. (b), (c) Fahrten mit (b) einem Beschleunigungsvorgang bzw. (c) sechs Beschleunigungsvorgängen von 0 km/h auf 30 km/h [64, 66, 67].

Diskussion der Positiven Kinetischen Energie

Eine mit der Kumulierten Beschleunigung vergleichbare bekannte Kenngröße zur Erfassung der Energieeffizienz von Fahrzeugen ist die „Positive Kinetische Energie“ (*PKE, positive acceleration kinetic energy per unit distance*) [71]. Bei der PKE werden anstelle der Geschwindigkeitsdifferenzen $v_{n+1} - v_n$ (vgl. Gl. (5.3)) die Differenzen der *Geschwindigkeitsquadrate* $v_{n+1}^2 - v_n^2$ aufsummiert. Aus dem folgenden Grund wird in dieser Arbeit nicht die PKE verwendet, sondern die Kumulierte Beschleunigung [65, 66].

Kraftstoffverbrauch bzw. die an der Batterie eines Elektrofahrzeugs anfallende Energiebilanz bilden die Gesamtenergie ab, die beim Fahren umgesetzt wird. Neben der kinetischen Energie, die mit der Beschleunigung zusammenhängt, gehen in die Gesamtenergie noch

weitere Anteile ein, die mit dem Fahrwiderstand, der Luftreibung, etwaigen Verbrauchern im Fahrzeug (z.B. Heizung, Licht, Radio) zusammenhängen, und der geschwindigkeitsabhängige Wirkungsgrad des Motors ist zu berücksichtigen (vgl. [19]). All diese genannten Anteile und Faktoren sind implizit in den empirischen mikroskopischen Matrizen (vgl. Abschnitt 5.1.1) enthalten. Diese mikroskopische Matrizen bilden die Gesamtenergie in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Beschleunigung ab. Die Abhängigkeit der Gesamtenergie von der Beschleunigung wird in dieser Arbeit durch die Kumulierte Beschleunigung in makroskopischer, d.h. größerer Sicht dargestellt.

5.2 Abhängigkeit der Kumulierten Fahrzeugbeschleunigung von der Zeitintervalldauer Δt zwischen GPS-Messungen

Die Kumulierte Beschleunigung ist als makroskopische Kenngröße für das Beschleunigungsverhalten eines Fahrzeugs auf einer Strecke eingeführt worden, die auf der Grundlage von Geschwindigkeitsverläufen aus anonymisierten GPS-Daten berechnet werden kann. Typischerweise beträgt das Zeitintervall Δt zwischen aufeinanderfolgenden GPS-Positionen, die von Navigationsgeräten übertragen werden, im Online-Betrieb 5 s oder 10 s (vgl. Abschnitt 3.4). In diesem Abschnitt wird am Beispiel mehrerer Geschwindigkeitsverläufe entlang Fahrzeugtrajektorien im übersättigten Verkehr gezeigt, wie sich der Wert von Δt auf das Ergebnis für die Kumulierte Beschleunigung auswirkt.

Durch Herausfiltern von GPS-Positionen und den zugehörigen Zeitstempeln ist für die betrachteten Beispiele Δt von ursprünglich 5 s schrittweise auf 30 s vergrößert worden. Geschwindigkeiten sind dann jeweils anhand der vergrößerten GPS-Positionen berechnet worden. Die resultierenden zeitlichen Geschwindigkeitsverläufe unterschiedlicher zeitlicher Auflösungen sind in den Abbildungen 5.10–5.13 gezeigt. In den jeweiligen Teilabbildungen (a) mit $\Delta t = 5$ s sind deutlich zeitlich-räumliche Verkehrsmuster zu erkennen (vgl. Kapitel 4): Folgen von Moving Queues in den Abbildungen 5.10 und 5.11 bzw. Strukturen des Synchronisierten Verkehrs in den Abbildungen 5.12 und 5.13. Auch bei zeitlicher Auflösung $\Delta t = 10$ s (Teilabbildungen (b)) lassen sich die entsprechenden Verkehrsmuster noch klar voneinander unterscheiden. Dies ändert sich bei weiterer Erhöhung von Δt (Teilabbildungen (c)–(e)): mit jeder Vergrößerung gehen mehr Informationen über den zeitlichen Geschwindigkeitsverlauf verloren. Dadurch können keine Verkehrsmuster mehr voneinander unterschieden werden.

5 Energieeffizienz von Fahrzeugen im übersättigten innerstädtischen Verkehr

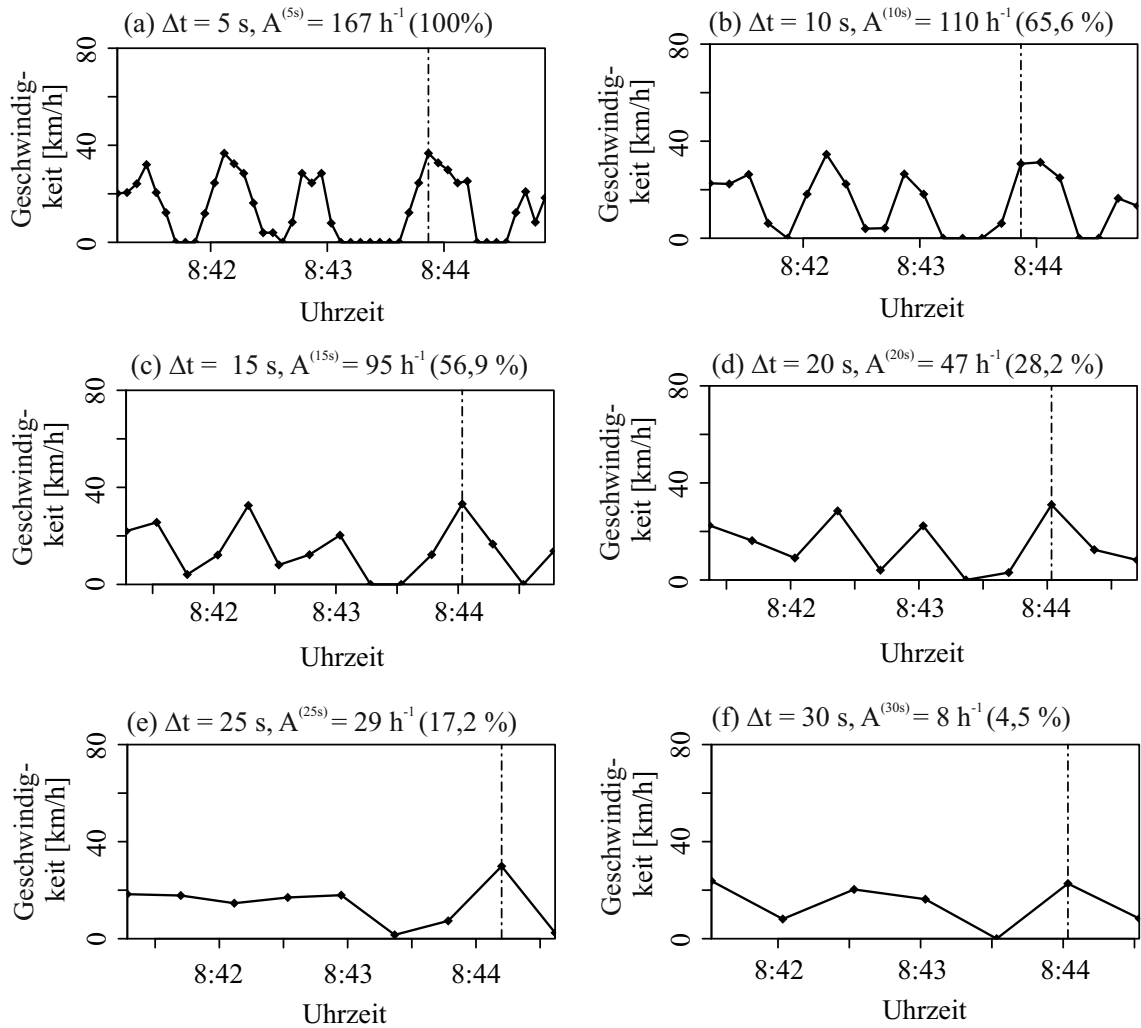


Abbildung 5.10: Beispiel 1 für die Abhängigkeit der Kumulierten Beschleunigung $A^{(\Delta t)}$ von der Dauer des Zeitintervalls Δt zwischen GPS-Positionsmessungen: Geschwindigkeitsprofil entlang einer auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1) gemessenen Fahrzeugtrajektorie aus anonymisierten GPS-Daten mit (a) $\Delta t = 5 \text{ s}$, (b) $\Delta t = 10 \text{ s}$, (c) $\Delta t = 15 \text{ s}$, (d) $\Delta t = 20 \text{ s}$, (e) $\Delta t = 25 \text{ s}$, (f) $\Delta t = 30 \text{ s}$. Angegeben ist jeweils die Kumulierte Beschleunigung $A^{(\Delta t)}$ und in Klammern das Verhältnis $A^{(\Delta t)}/A^{(5s)}$. Die strichpunktigten Linien (sofern vorhanden) markieren den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA.

5.2 Abhängigkeit der Kumulierten Fahrzeugbeschleunigung...

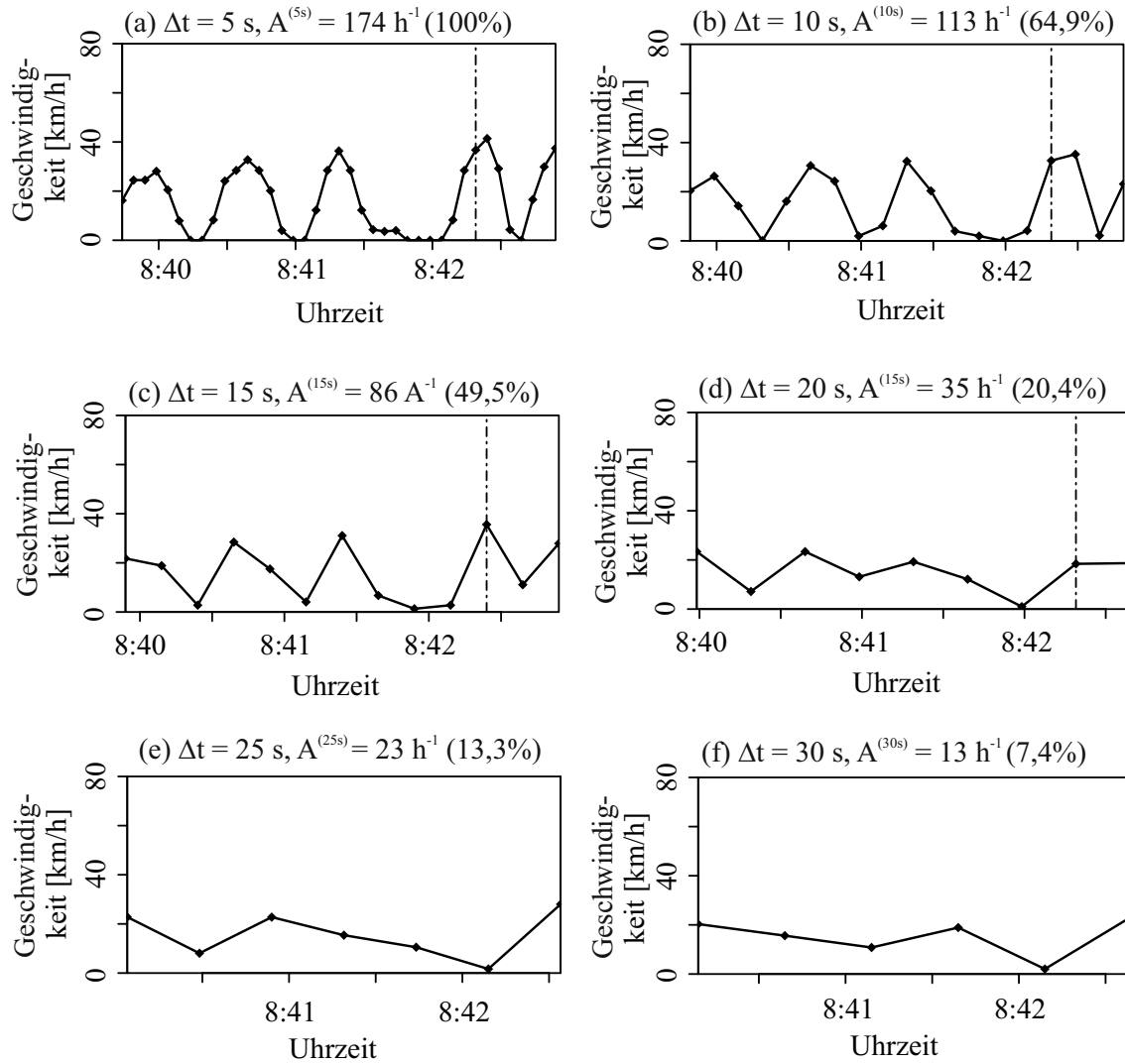


Abbildung 5.11: Beispiel 2 für die Abhängigkeit der Kumulierten Beschleunigung $A^{(\Delta t)}$ von der Dauer des Zeitintervalls Δt zwischen GPS-Positionsmessungen: Geschwindigkeitsprofil entlang einer auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1) gemessenen Fahrzeugtrajektorie aus anonymisierten GPS-Daten mit (a) $\Delta t = 5$ s, (b) $\Delta t = 10$ s, (c) $\Delta t = 15$ s, (d) $\Delta t = 20$ s, (e) $\Delta t = 25$ s, (f) $\Delta t = 30$ s. Angegeben ist jeweils die Kumulierte Beschleunigung $A^{(\Delta t)}$ und in Klammern das Verhältnis $A^{(\Delta t)} / A^{(5s)}$. Die strichpunktierten Linien (sofern vorhanden) markieren den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA. Das Geschwindigkeitsprofil aus (a) wurde auch in Abb. 4.1 gezeigt.

5 Energieeffizienz von Fahrzeugen im übersättigten innerstädtischen Verkehr

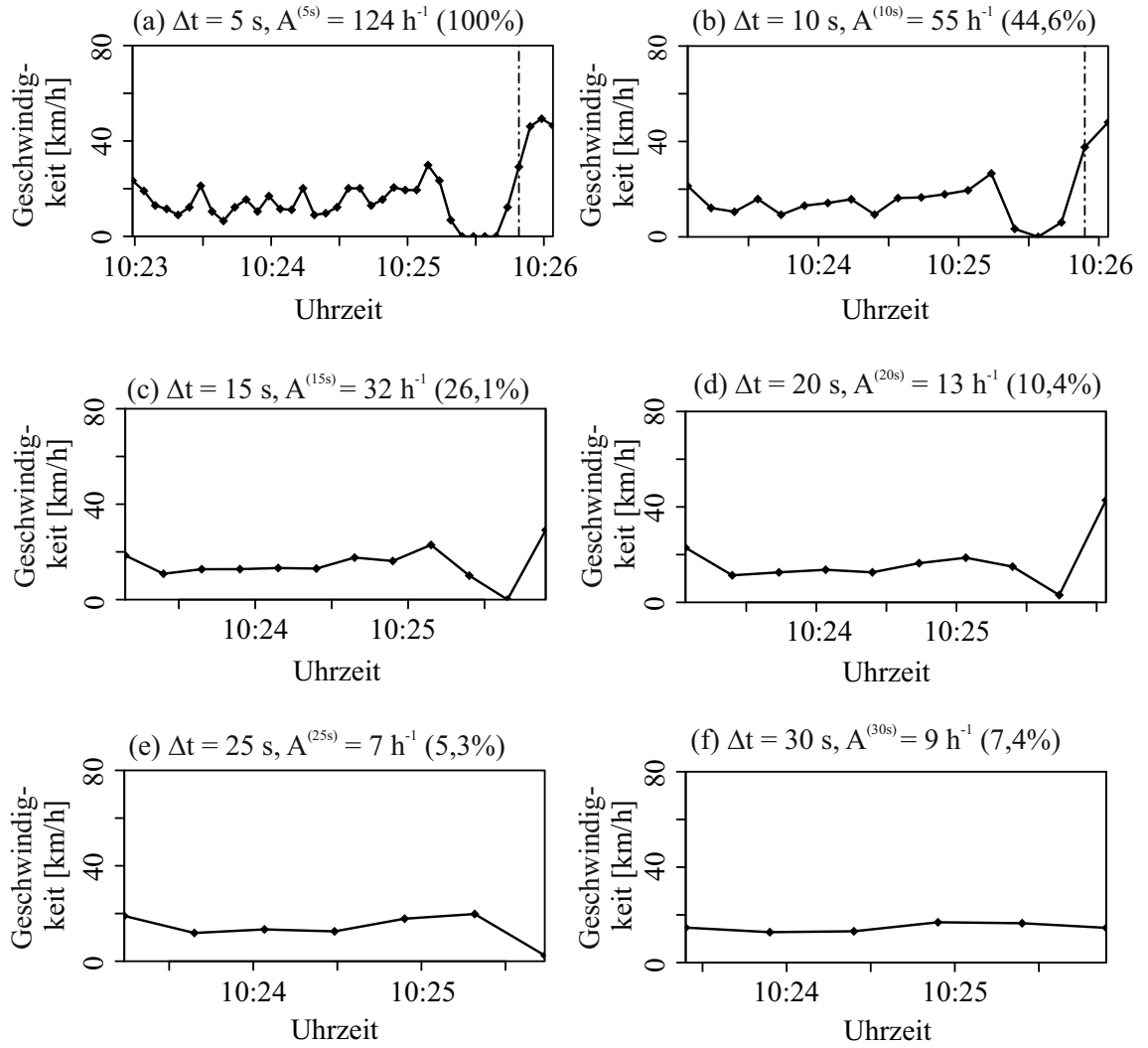


Abbildung 5.12: Beispiel 3 für die Abhängigkeit der Kumulierten Beschleunigung $A^{(\Delta t)}$ von der Dauer des Zeitintervalls Δt zwischen GPS-Positionsmessungen: Geschwindigkeitsprofil entlang einer auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1) gemessenen Fahrzeugtrajektorie aus anonymisierten GPS-Daten mit (a) $\Delta t = 5 \text{ s}$, (b) $\Delta t = 10 \text{ s}$, (c) $\Delta t = 15 \text{ s}$, (d) $\Delta t = 20 \text{ s}$, (e) $\Delta t = 25 \text{ s}$, (f) $\Delta t = 30 \text{ s}$. Angegeben ist jeweils die Kumulierte Beschleunigung $A^{(\Delta t)}$ und in Klammern das Verhältnis $A^{(\Delta t)}/A^{(5s)}$. Die strichpunktierten Linien (sofern vorhanden) markieren den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA. Das Geschwindigkeitsprofil aus (a) wurde auch in Abb. 4.8 (b) gezeigt.

5.2 Abhängigkeit der Kumulierten Fahrzeugbeschleunigung...

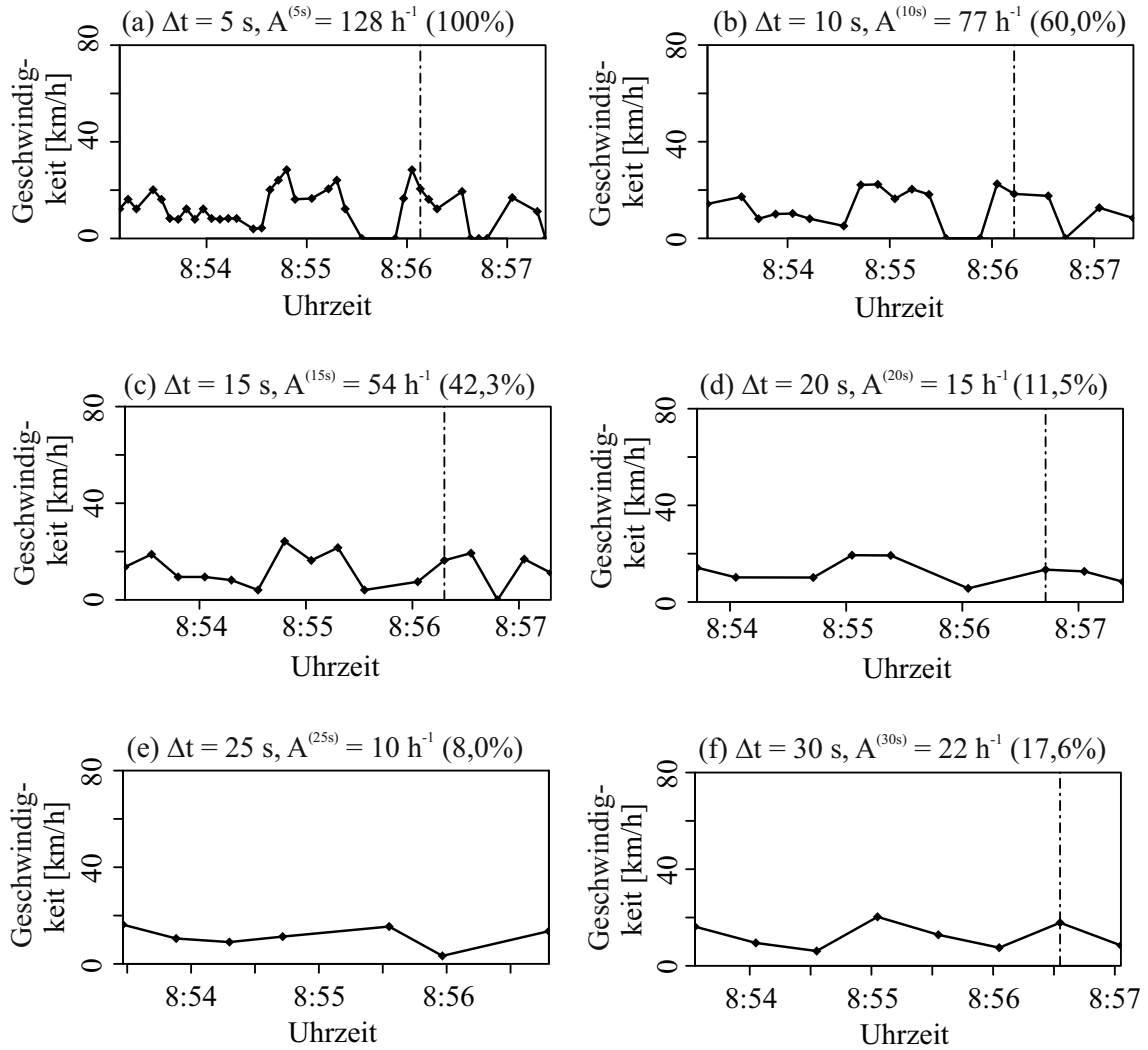


Abbildung 5.13: Beispiel 4 für die Abhängigkeit der Kumulierten Beschleunigung $A^{(\Delta t)}$ von der Dauer des Zeitintervalls Δt zwischen GPS-Positionsmessungen: Geschwindigkeitsprofil entlang einer auf dem Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ (vgl. Abb. 3.1) gemessenen Fahrzeugtrajektorie aus anonymisierten GPS-Daten mit (a) $\Delta t = 5 \text{ s}$, (b) $\Delta t = 10 \text{ s}$, (c) $\Delta t = 15 \text{ s}$, (d) $\Delta t = 20 \text{ s}$, (e) $\Delta t = 25 \text{ s}$, (f) $\Delta t = 30 \text{ s}$. Angegeben ist jeweils die Kumulierte Beschleunigung $A^{(\Delta t)}$ und in Klammern das Verhältnis $A^{(\Delta t)}/A^{(5s)}$. Die strichpunktierten Linien (sofern vorhanden) markieren den jeweils zeitlich ersten Wert nach Überfahren der LSA.

In den Abbildungen 5.10–5.13 sind zu den jeweiligen Teilabbildungen die Werte für die Kumulierte Beschleunigung $A^{(\Delta t)}$ bei entsprechender zeitlicher Auflösung angegeben sowie relative Werte $A^{(\Delta t)}/A^{(5s)}$. Die Abhängigkeit der absoluten und relativen Kumulierten Beschleunigung von Δt ist in Abb. 5.14 gezeigt. Bei den absoluten Werten $A^{(\Delta t)}$ in Abb. 5.14 (a) erkennt man eine Lücke, die die Werte der Beispiele 1 und 2 (Moving Queues) von den Werten der Beispiele 3 und 4 (Synchronisierter Verkehr) trennt. Diese Lücke wird mit zunehmendem Δt kleiner und verschwindet für $\Delta t = 30$ s. An den relativen Werten $A^{(\Delta t)}/A^{(5s)}$ in Abb. 5.14 (b) sieht man, dass der relative Informationsverlust mit wachsendem Δt von Schritt zu Schritt für die verschiedenen Beispiele ähnlich ist. Für Beispiel 3 (Abb. 5.12) ist dieser relative Informationsverlust schon bei $\Delta t = 10$ s verhältnismäßig groß. Dies liegt daran, dass die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen zwei Messwerten bei diesem Beispiel auf einer Zeitskala von 5 Sekunden häufig das Vorzeichen ändert. Diese Vorzeichenänderungen der Geschwindigkeitsdifferenz, die sich in Abb. 5.12 (a) in einem zackigen Geschwindigkeitsverlauf widerspiegeln, werden bereits mit $\Delta t = 10$ s nicht mehr abgebildet. Für die Beispiele 3 und 4 wächst $A^{(\Delta t)}$ bzw. $A^{(\Delta t)}/A^{(5s)}$ vom 25-s-Wert zum 30-s-Wert wieder geringfügig an. Dies liegt daran, dass jeweils verschiedene GPS-Positionen als Stützstellen in die Berechnung eingehen. Für den Rest dieser Arbeit werden stets Werte der kumulierten Beschleunigung bezogen auf das Zeitintervall $\Delta t = 5$ s zwischen Messungen diskutiert.

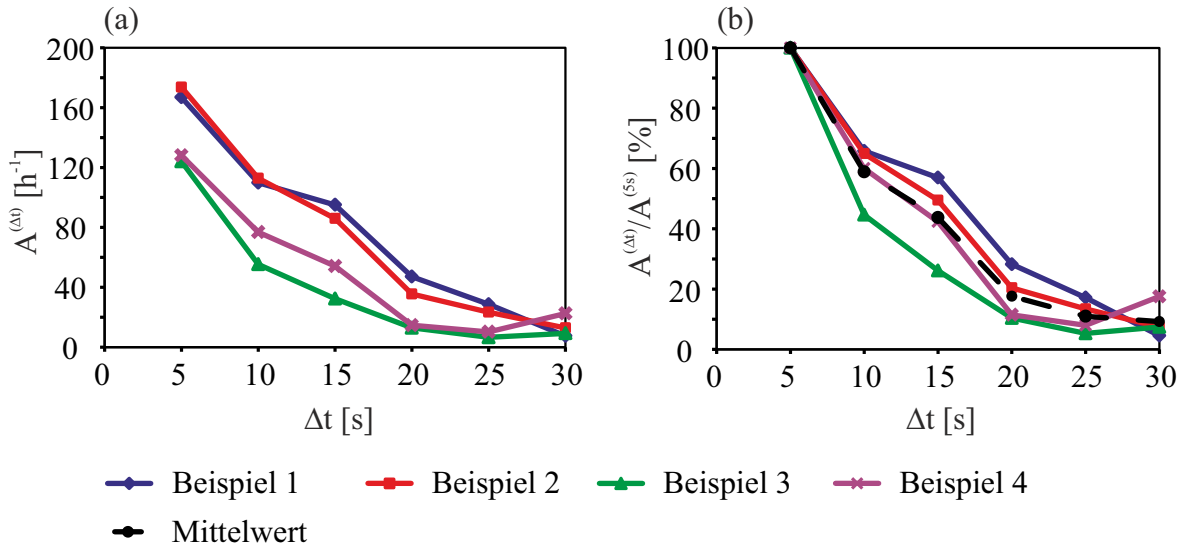


Abbildung 5.14: Abhängigkeit (a) der Kumulierten Beschleunigung $A^{(\Delta t)}$ und (b) des Verhältnisses $A^{(\Delta t)}/A^{(5s)}$ von der Dauer des Zeitintervalls Δt zwischen GPS-Positionsmessungen für die in den Abbildungen 5.10–5.13 gezeigten Beispiele.

5.3 Kumulierte Beschleunigung im empirischen Synchronisierten Verkehr

In diesem Abschnitt wenden wir die Definition der Kumulierten Beschleunigung auf empirische Geschwindigkeitsverläufe entlang Fahrzeugtrajektorien aus anonymisierten GPS-Daten im übersättigten Verkehr an [64, 66]. Wir vergleichen Strukturen des Synchronisierten Verkehrs mit klassischen Folgen von Moving Queues bezüglich der Kumulierten Beschleunigung. Diese Untersuchung bezieht sich auf die empirischen Beispiele aller drei Streckenabschnitte, die in der vorliegenden Arbeit für die empirische Untersuchung von Verkehrsmustern betrachtet wurden (vgl. Abb. 3.1). Dies ist möglich, da Werte der Kumulierten Beschleunigungen zu Fahrzeugtrajektorien unterschiedlicher Streckenabschnitte aufgrund der Division durch die Streckenlänge in Gl. (5.3) miteinander vergleichbar sind. So wird die Kumulierte Beschleunigung hier als A bezeichnet anstelle von A_j .

Bei der Untersuchung physikalischer Eigenschaften von Folgen von Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs in Abschnitt 4.1.3 sind jeweils nur die Anteile der Fahrzeugtrajektorien betrachtet worden, in denen das Fahrzeug das jeweilige Verkehrsmuster durchfährt (Bereiche, die in den Abbildungen zeitlicher Geschwindigkeitsverläufe der Abbildungen 4.1–4.14 mit „MQ“ bzw. „SP“ gekennzeichnet sind). Im Gegensatz dazu erfolgt die Berechnung von A jeweils über den gesamten Streckenabschnitt. Das entspricht in den Abbildungen zeitlicher Geschwindigkeitsverläufe aus Kapitel 4 und Abb. 5.7 allen Punkten links der strichpunktierten Linien, die das Passieren der Lichtsignalanlagen markieren. Grund hierfür ist die intendierte Anwendung der Kumulierten Beschleunigung zur Online-Berechnung energieeffizienter Routen: Die Bestimmung der optimalen Route erfolgt auf der Grundlage vorgegebener Streckenabschnitte eines Straßennetzes. So geht hier auch der Teil der Fahrzeugtrajektorien in die Berechnungen ein, in dem die Fahrzeuge nach dem Durchfahren sowohl von Strukturen des Synchronisierten Verkehrs als auch von Folgen von Moving Queues direkt an der Lichtsignalanlage warten.

In Abb. 5.15 ist die Kumulierte Beschleunigung für alle empirischen Beispiele von Folgen von Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs aus den Abbildungen 4.1–4.14 in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit V entlang der Trajektorie aufgetragen. Mittlere Geschwindigkeiten liegen für die Folgen von Moving Queues zwischen 8 km/h und 14 km/h. Für die Strukturen des Synchronisierten Verkehrs liegen sie zwischen 12 km/h und 20 km/h.

Die Kumulierte Beschleunigung ist für Folgen von Moving Queues deutlich größer als für Strukturen des Synchronisierten Verkehrs: Für Strukturen des Synchronisierten Verkehrs liegen die Werte zwischen 55 h^{-1} und 152 h^{-1} und für Folgen von Moving Queues zwischen 171 h^{-1} und 216 h^{-1} . Damit ist die Streuung der Werte von A für Strukturen des Synchronisierten Verkehrs deutlich größer als für Moving Queues. Zwischen den Wertebereichen der Kumulierten Beschleunigung für die Strukturen des Synchronisierten Verkehrs und für die Folgen von Moving Queues gibt es keine Überlappung.

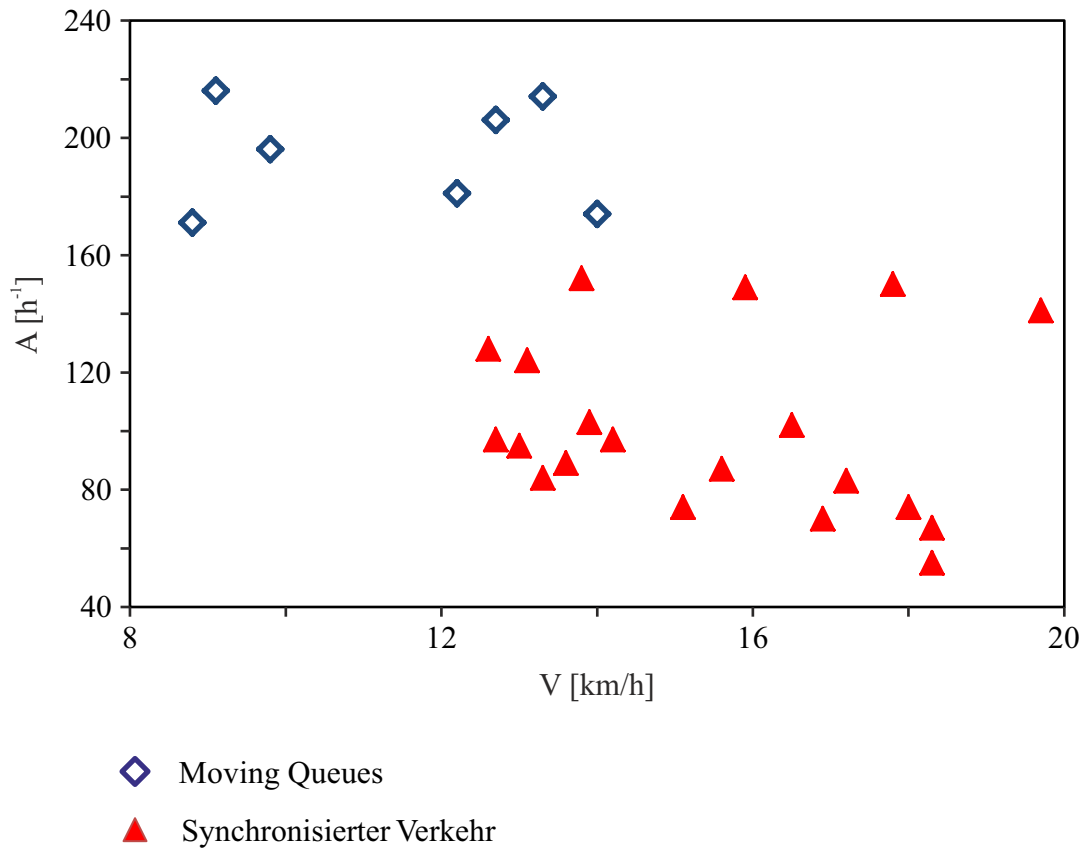


Abbildung 5.15: Kumulierte Beschleunigung A pro Streckenlänge in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit V . Aufgetragen sind die Wertepaare zu allen empirischen Beispielen für Folgen von Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs aus den Abbildungen 4.1–4.14 in Kapitel 4.

In Abb. 5.16 sind die V - A -Wertepaare aus Abb. 5.15 mit mittleren Geschwindigkeiten zwischen 10 km/h und 15 km/h erneut gezeigt. Dies ist der Bereich, in dem mittlere Geschwindigkeiten entlang Fahrzeugtrajektorien sowohl von Folgen von Moving Queues als auch von Strukturen des Synchronisierten Verkehrs liegen. Dazu sind in Abb. 5.16 auch die Mittelwerte von A für die jeweiligen Verkehrsmuster eingezeichnet. Bei mittleren Geschwindigkeiten V zwischen 10 km/h und 15 km/h ergibt sich für Folgen von Moving Queues im Mittel eine Kumulierte Beschleunigung von 194 h^{-1} . Für die Beispiele von Strukturen des Synchronisierten Verkehrs liegt der Mittelwert von A bei 108 h^{-1} .

5.4 Energieeffizienz von Fahrzeugen in Abhängigkeit der Kumulierten Beschleunigung

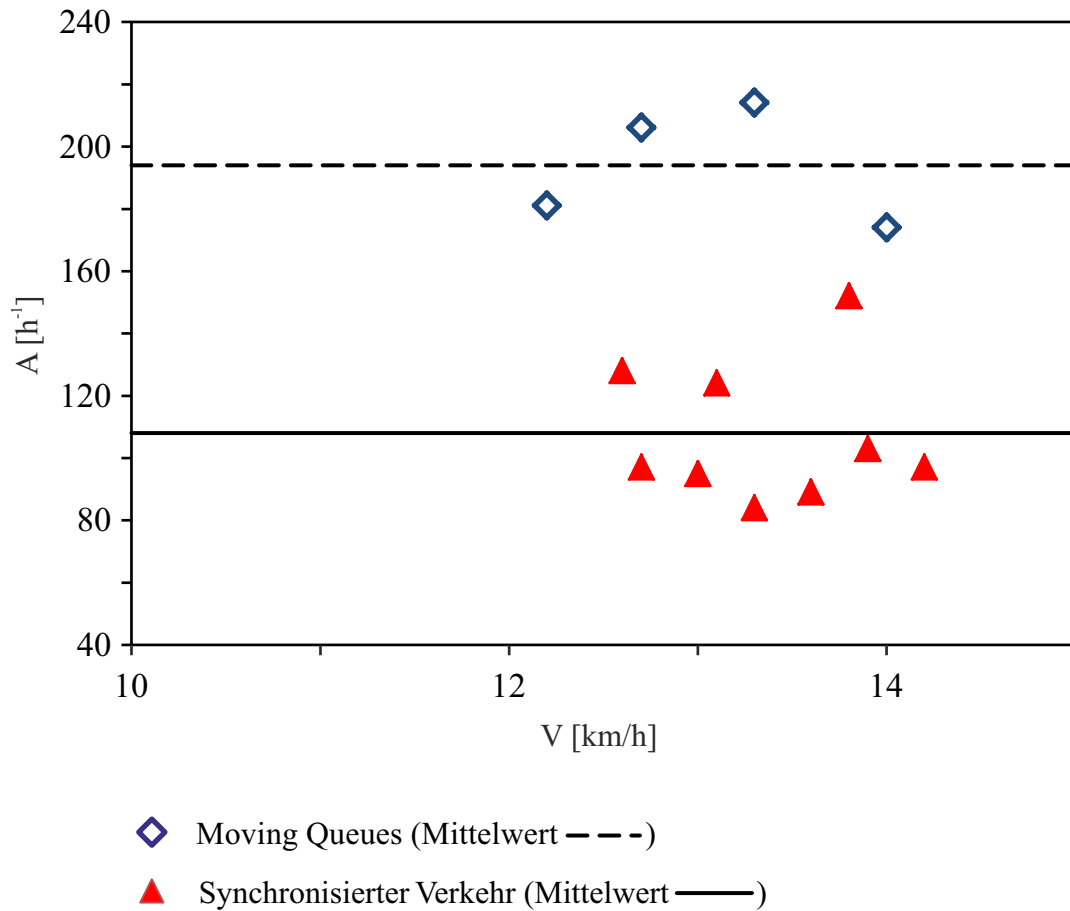


Abbildung 5.16: Kumulierte Beschleunigung A pro Streckenlänge in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit V . Aufgetragen sind die Wertepaare zu allen empirischen Beispielen für Folgen von Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs aus den Abbildungen 4.1–4.14, mit mittleren Geschwindigkeiten V zwischen 10 km/h und 15 km/h. Mittelwerte für beide Verkehrsmuster sind durch horizontale Linien gekennzeichnet.

5.4 Energieeffizienz von Fahrzeugen in Abhängigkeit der Kumulierten Beschleunigung

Nachdem in Abschnitt 5.3 empirische Verkehrsmuster des übersättigten Verkehrs bezüglich der Kumulierten Beschleunigung verglichen worden sind, sollen diese Ergebnisse nun mit der Energieeffizienz von Fahrzeugen verknüpft werden. Als Maß für die Energieeffizienz von Fahrzeugen wird dabei beispielhaft der Kraftstoffverbrauch von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor herangezogen. In Abschnitt 5.3 ist anhand empirischer Daten gezeigt

worden, dass Folgen von Moving Queues mit einer größeren Kumulierten Beschleunigung zusammenhängen als Strukturen des Synchronisierten Verkehrs. Um dieses Ergebnis mit dem Kraftstoffverbrauch zu verknüpfen, wird der Zusammenhang zwischen der Kumulierten Beschleunigung und dem relativen Verbrauch anhand simulierter Fahrzeugtrajektorien untersucht. Als Eingangsdaten für Verbrauchsberechnungen mit der empirischen mikroskopischen Verbrauchsmatrix (vgl. Abb. 5.2) werden sekundliche Werte v_1, \dots, v_N und a_1, \dots, a_N benötigt (vgl. Abschnitt 5.1.1). Eine Verkehrsflusssimulation kann einen vollständigen Satz sekundlicher Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte für alle Trajektorien eines Simulationsdurchlaufs ausgeben. Zudem kann durch die Durchführung vieler Simulationsdurchläufe eine Anzahl simulierter Trajektorien erzeugt werden, die für statistische Aussagen hinreichend groß ist [64–67].

Da untersucht werden soll, wie sich Synchronisierter Verkehr und Moving Queues auf den Kraftstoffverbrauch auswirken, müssen die verwendeten Verkehrsflusssimulationen diese empirisch belegten Verkehrsmuster reproduzieren können [65–67]. Um dies zu gewährleisten, werden in dieser Arbeit Daten aus Simulationen mit einem stochastischen Kerner-Klenov-Modell verwendet [44, 45]. Dieses Modell basiert auf der Drei-Phasen-Verkehrstheorie und kann sowohl Moving Queues als auch Synchronisierten Verkehr nachbilden (vgl. die Abbildungen 2.13 und 2.14 in Kapitel 2). Für die Verbrauchsberechnungen im Rahmen dieser Arbeit wurden Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte zu über 400 000 simulierten Fahrzeugtrajektorien aus Simulationen des innerstädtischen Verkehrs an einer Lichtsignalanlage von Hermanns bereitgestellt [46]. Die Straßengeometrie in der Simulation ist dem realen Streckenabschnitt „Völklinger Straße“ nachgebildet (vgl. Abb. 3.1).

Von diesen simulierten Trajektorien wählen wir diejenigen aus, bei denen die mittlere Geschwindigkeit entlang des Streckenabschnittes zwischen 10 km/h und 15 km/h liegt [64–67]. Wir betrachten dieses Intervall, da in empirischen Fahrzeugtrajektorien mit den entsprechenden mittleren Geschwindigkeiten sowohl Synchronisierter Verkehr als auch Moving Queues beobachtet werden (vgl. Abb. 5.16). Für die ausgewählten simulierten Trajektorien wurde auf den sekundlichen Werten von Geschwindigkeit und Beschleunigung der relative Verbrauch mit der empirischen mikroskopischen Verbrauchsmatrix für Verbrennerfahrzeuge (Abb. 5.2) berechnet. Zusätzlich wurde für diese Trajektorien auch die Kumulierte Beschleunigung A berechnet. Während der relative Verbrauch auf sekundlichen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdaten berechnet wurde, erfolgte die Berechnung von A auf über fünf Sekunden gemittelten Geschwindigkeitswerten. So ist die Vergleichbarkeit zwischen der Kumulierten Beschleunigung simulierter Trajektorien und empirischer Trajektorien mit $\Delta t = 5$ s gewährleistet.

Entsprechend ihrer Kumulierten Beschleunigung wurden die simulierten Trajektorien in Klassen sortiert. Als Klassen wurden Intervalle der Kumulierten Beschleunigung mit der Breite $\Delta A = 40 \text{ h}^{-1}$ zugrunde gelegt. Für alle Klassen, die mindestens 50 simulierte Trajektorien beinhalten, wurde der Verbrauchsmittelwert über alle enthaltenen Trajektorien berechnet [64–67].

5.4 Energieeffizienz von Fahrzeugen in Abhängigkeit der Kumulierten Beschleunigung

Die resultierende Abhängigkeit des mittleren relativen Verbrauchs von der Kumulierten Beschleunigung ist in Abb. 5.17 gezeigt [64–67]: Im Vergleich zu einer Fahrt mit zeitunabhängiger Geschwindigkeit (vgl. Gl. (5.2)) fällt im übersättigten Verkehr bei mittleren Fahrzeuggeschwindigkeiten zwischen 10 km/h und 15 km/h mehr als der zweifache Verbrauch an. Zudem steigt mit der Kumulierten Beschleunigung der mittlere relative Verbrauch deutlich von Klasse zu Klasse an. Ein analoger Zusammenhang zwischen elektrischer Energie und kumulierter Beschleunigung kann für Elektrofahrzeuge unter Verwendung der entsprechenden empirischen mikroskopischen Energiematrix (Abb. 5.3) hergestellt werden. Hierzu verweisen wir auf Kapitel 6.

Wir setzen die in Abb. 5.17 gezeigte Abhängigkeit des mittleren relativen Verbrauchs von der Kumulierten Beschleunigung mit den empirischen Verkehrsmustern des übersättigten Verkehrs nach Einbruch der Geschwindigkeit in Beziehung [64, 66]. Hierzu betrachten wir das Ergebnis aus Abschnitt 5.3, dass die Kumulierte Beschleunigung in empirischen Moving Queues deutlich größer ist als in empirischen Strukturen des Synchronisierten Verkehrs (vgl. die Mittelwerte von A aus Abb. 5.16). Den Kumulierten Beschleunigungen der empirischen Moving Queues mit Mittleren Geschwindigkeiten zwischen 10 km/h und 15 km/h lässt sich gemäß Abb. 5.17 im Mittel ein relativer Verbrauch von 3,1 zuordnen. Dem empirischen Synchronisierten Verkehr entspricht dagegen im Mittel ein relativer Verbrauch von 2,5. Somit ist der durchschnittliche relative Verbrauch in übersättigtem Verkehr deutlich höher, wenn der übersättigte Verkehr aus Moving Queues besteht, als wenn er aus Synchronisiertem Verkehr besteht.

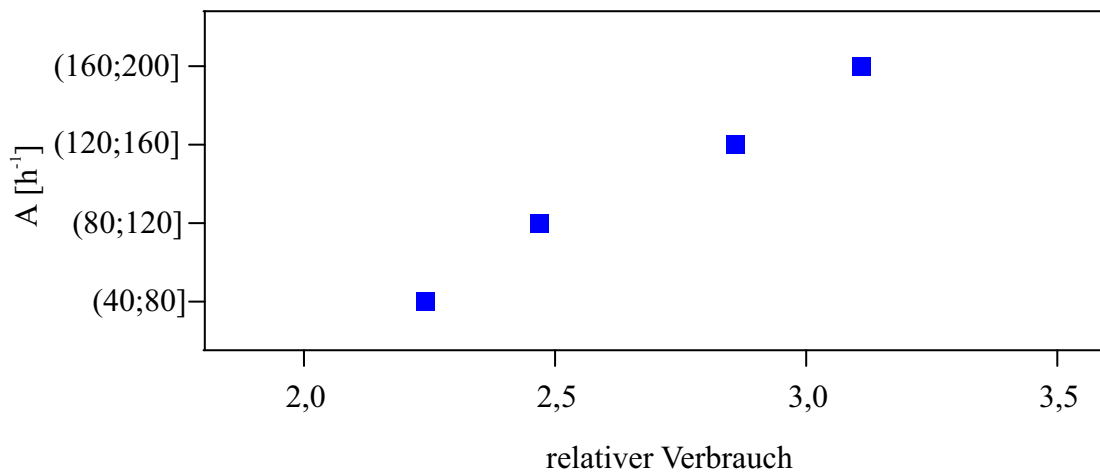


Abbildung 5.17: Abhängigkeit des mittleren relativen Verbrauchs von der Kumulierten Beschleunigung A pro Streckenlänge für simulierte Trajektorien mit mittleren Geschwindigkeiten zwischen 10 km/h und 15 km/h [64–67].

5.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der Zusammenhang typischer empirischer Verkehrsmuster des übersättigten Verkehrs, Folgen von Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs, mit der Energieeffizienz von Fahrzeugen untersucht. Hierbei wurde die Kumulierte Beschleunigung pro Streckenlänge als makroskopische Kenngröße für die Energieeffizienz verwendet, die die Stärke und die Häufigkeit von Beschleunigungsvorgängen entlang einer Fahrzeugtrajektorie abbildet. Die Kumulierte Beschleunigung ist für die Abschätzung des Kraftstoffverbrauchs bzw. der Energieeffizienz von Fahrzeugen anhand anonymisierter realer GPS-Daten geeignet. Hierbei ist $\Delta t = 5$ s ein geeignetes Zeitintervall zwischen aufeinanderfolgenden GPS-Messungen. Die Untersuchungen ergaben die folgenden Hauptergebnisse [64, 66].

1. Die Kumulierte Beschleunigung ist für Moving Queues deutlich größer als für Synchronisierten Verkehr.
2. Der Kraftstoffverbrauch von Fahrzeugen wächst mit wachsender Kumulierter Beschleunigung.
3. Aus den Punkten 1 und 2 folgt: Der Kraftstoffverbrauch im übersättigten Verkehr ist größer, wenn der übersättigte Verkehr aus Moving Queues besteht, als wenn er aus Synchronisiertem Verkehr besteht.

Eine technische Anwendung der Ergebnisse dieses Kapitels liegt in der Berechnung energieeffizienter Routen für die Navigation und für das Verkehrsmanagement. Diese Anwendungsmöglichkeit wird im folgenden Kapitel sowohl für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor als auch für Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb erläutert.

6 Online-Berechnung der streckenabhängigen Energieeffizienz in innerstädtischen Straßennetzen

In Kapitel 4 wurde gezeigt, dass empirischer übersättigter Verkehr nach Einbruch der Geschwindigkeit aus Mischungen von Moving Queues und Synchronisiertem Verkehr besteht, und in Kapitel 5 wurde die Auswirkung dieser empirischen Verkehrsmuster auf die Energieeffizienz von Fahrzeugen untersucht. Im vorliegenden Kapitel wird eine praktische Anwendung dieser Ergebnisse für die Online-Berechnung energieeffizienter Routen in der Navigation und im Verkehrsmanagement aufgezeigt. Hierzu werden makroskopische Energiematrizen aufgestellt, die die Energieeffizienz von Fahrzeugen in Abhängigkeit geeigneter Kenngrößen abbilden: Für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor sind dies die mittlere Geschwindigkeit entlang der Fahrzeugtrajektorie und die Kumulierte Beschleunigung pro Streckenlänge. Für Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb wird die Vorgehensweise durch eine zusätzliche Berücksichtigung der Kumulierten Verzögerung angepasst. So soll auch die Rekuperation elektrischer Energie beim Bremsen abgebildet werden. Datengrundlage für die makroskopischen Energiematrizen sind empirische mikroskopische Energiematrizen (vgl. Abschnitt 5.1.1), die auf Fahrzeugtrajektorien aus Verkehrsflusssimulationen angewendet werden.

In dieser Arbeit sind mit den Begriffen „Fahrzeug mit Verbrennungsmotor“ bzw. „Fahrzeug mit elektrischem Antrieb“ stets reine Verbrenner- und Elektrofahrzeuge gemeint. Fahrzeuge mit Hybridantrieb werden nicht behandelt (vgl. z.B. die Arbeit von Wu *et al.* über Energiemanagement-Strategien für Plug-In-Hybridfahrzeuge [72]).

6.1 Grundlagen zur streckenabhängigen Energieeffizienz

Die Bestimmung energieeffizienter Routen und die Fahrzeugnavigation unter Optimierung der Energieeffizienz werden oft unter dem Begriff „Eco-Routing“ zusammengefasst [65]. In zahlreichen Arbeiten ist untersucht worden, wie sich Routenwahl, Verkehrssituation und das Fahrverhalten auf Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen auswirken. Nie und Li entwickelten ein Eco-Routing-Modell, das Betriebszustände eines Fahrzeugs wie Leerlauf oder Beschleunigung berücksichtigt [73]. Sie überprüften ihr Modell anhand numerischer Experimente auf schematischen städtischen Straßennetzen. Osorio und Nanduri

behandelten energieeffizientes Verkehrsmanagement als Optimierungsproblem, wobei sie Verkehrssimulationen und Verbrauchsmodelle kombinierten [74]. Nesamani *et al.* schlugen einen Satz „emissionsspezifischer Charakteristiken“ wie Verkehrsfluss, Geschwindigkeit und Fahrzeugtyp vor und untersuchten diese mit Verkehrs- und Emissionsmodellen [75]. Bandeira *et al.* verwendeten GPS-Daten von Floating Cars als Eingabegröße für ein dynamisches Emissionsmodell [76]. Auch Barth und Boriboonsomsin kombinierten GPS-Daten mit Emissionsmodellen und verwendeten zusätzlich Daten von Schleifendetektoren [77]. Mehrere Alternativrouten wurden von Minett *et al.* im Hinblick auf die Energieeffizienz untersucht [78]. Dazu wendeten sie sowohl auf Feldversuchsdaten als auch auf „synthetische“ Geschwindigkeitsprofile ein Verbrauchsmodell an. Neben dem „Eco-Routing“ ist auch das „Eco-Driving“, also die Auswirkung des Fahrverhaltens auf Energieeffizienz und Schadstoffemissionen, untersucht worden [79, 80]. Außerdem sind Verkehrstelematik-Systeme zur Energieersparnis vorgeschlagen worden, die den Fahrer über den Status der Lichtsignalanlage informieren [81, 82].

Im Eco-Routing werden üblicherweise makroskopische Energie- oder Emissionsklassen gebildet, denen individuelle Fahrzeugtrajektorien zugeordnet werden können. So wurde zum Beispiel der streckenabhängige LOS (*Level of Service*, vgl. [41]) Verbrauchs- und Emissionswerten zugeordnet [83]. Alternativ ist eine Klassifizierung von Fahrzeugtrajektorien in „modale durchschnittliche Emissionsraten“ auf der Grundlage der fahrzeugspezifischen Leistung (VSP, *vehicle specific power*) vorgeschlagen worden [84, 85].

Gemeinsam mit Kollegen erarbeitete der Autor dieser Arbeit ein Klassifikationsschema für innerstädtische Fahrzeugtrajektorien, das verschiedenen Kombinationen der mittleren Geschwindigkeit und der Anzahl der Anhaltevorgänge mittlere Verbrauchswerte zuordnet [68, 86, 87]. Dabei erwies es sich als schwierig, eine geeignete Definition für die Kenngröße „Anzahl der Anhaltevorgänge“ zu finden. Außerdem kann die Anzahl der Anhaltevorgänge nicht den Energieverbrauch im Synchronisierten Verkehr abbilden, in dem Fahrzeuge mit niedriger Geschwindigkeit fahren und nicht anhalten (vgl. Abschnitt 4.1.2). Aus diesen Gründen wurde die Anzahl der Anhaltevorgänge als Kenngröße für die Energieeffizienz aufgegeben und stattdessen die von Kerner eingeführte Kumulierte Beschleunigung ([70], vgl. Abschnitt 5.1.2) bei der Erstellung makroskopischer Energiematrizen verwendet.

6.2 Makroskopische Energiematrizen

6.2.1 Makroskopische Verbrauchsmatrix für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor

In Abschnitt 5.4 ist die Abhängigkeit des Kraftstoffverbrauchs von der Kumulierten Beschleunigung bei mittleren Fahrzeuggeschwindigkeiten zwischen 10 km/h und 15 km/h diskutiert worden. Als Datengrundlage dienten eine empirische mikroskopische Verbrauchsmatrix (Abb. 5.2) und Fahrzeugtrajektorien aus einer Verkehrsflusssimulation. Die si-

mulierten Trajektorien waren aus einer Menge von über 400 000 Trajektorien, die von Hermanns zur Verfügung gestellt worden waren [46], anhand der mittleren Geschwindigkeit ausgewählt worden. Für die Erstellung einer makroskopischen Verbrauchsmatrix werden nun auch die übrigen simulierten Trajektorien hinzugezogen, um die gesamte Breite typischer mittlerer Geschwindigkeiten des innerstädtischen Verkehrs zwischen 0 km/h und 65 km/h abzudecken [65–67].

Die simulierten Trajektorien werden anhand ihrer mittleren Geschwindigkeit V und ihrer Kumulierten Beschleunigung A klassifiziert [65–67]. Wie auch in Abschnitt 5.4 beträgt die Klassenbreite für A stets 40 h^{-1} . Für die mittlere Geschwindigkeit wurden Intervalle verschiedener Breiten zur Klassifizierung ausgewählt: Für mittlere Geschwindigkeiten unter 20 km/h beträgt die Intervallbreite stets 5 km/h, hinzu kommt das Intervall (20;30] und das Intervall (30;65] (Intervallgrenzen in km/h). Für alle Klassen, die mindestens 50 simulierte Trajektorien umfassen, wurde der mittlere relative Verbrauch berechnet. Die resultierende makroskopische Verbrauchsmatrix M_C ist in Abb. 6.1 gezeigt. Die Höhe der Balken entspricht dem relativen Verbrauch für eine gegebene Kombination von Klassen der mittleren Geschwindigkeit V und der Kumulierten Beschleunigung A .

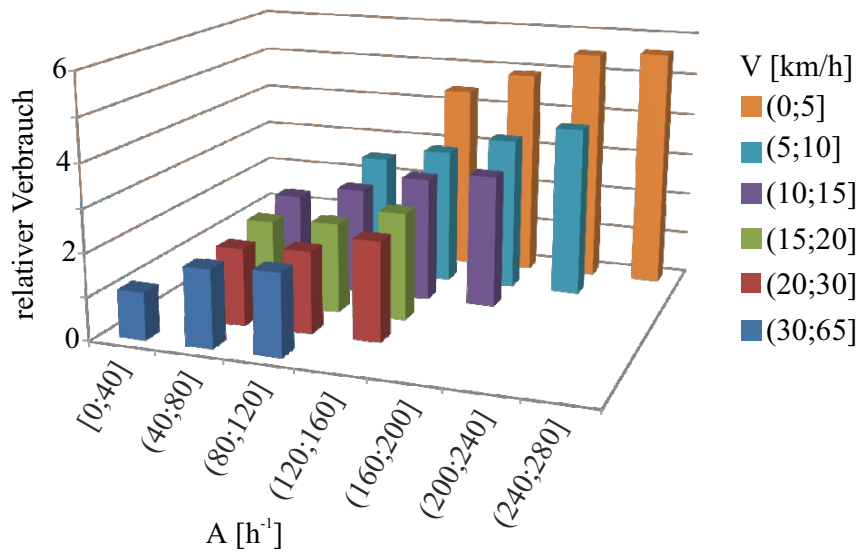


Abbildung 6.1: Makroskopische Verbrauchsmatrix M_C für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor: Abhängigkeit des mittleren relativen Verbrauchs von der mittleren Geschwindigkeit V und der Kumulierten Beschleunigung A [65–67].

Die makroskopische Verbrauchsmatrix M_C bildet den folgenden Zusammenhang von V und A mit dem relativen Verbrauch ab [64–67].

1. Bei gegebener Kumulierter Beschleunigung wächst der mittlere relative Verbrauch mit abnehmender mittlerer Geschwindigkeit.

2. Bei gegebener mittlerer Geschwindigkeit wächst der mittlere relative Verbrauch mit wachsender Kumulierter Beschleunigung.

6.2.2 Makroskopische Energiematrizen für Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb

Bei Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb wird beim Fahren die in der Batterie gespeicherte elektrische Energie nicht nur verbraucht: Beim Bremsen wird auch elektrische Energie rekuperiert. Verbrauchte elektrische Energie wird in dieser Arbeit mit positivem Vorzeichen dargestellt, rekuperierte elektrische Energie mit negativem Vorzeichen. Durch die Rekuperation elektrischer Energie grenzen sich Elektrofahrzeuge von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ab, für die der Kraftstoffverbrauch beim Fahren stets positiv oder gleich null ist. Um diesen Unterschied zwischen Elektro- und Verbrennerfahrzeugen bei der Bestimmung der verkehrsabhängigen Energieeffizienz abzubilden, wird die in Abschnitt 6.2.1 beschriebene Vorgehensweise abgewandelt [64]. Wie bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor werden mittlere Geschwindigkeit V und Kumulierte Beschleunigung A als makroskopische Kenngrößen verwendet, die die positive Beschleunigung und die Geschwindigkeit entlang Fahrzeugtrajektorien repräsentieren. Zusätzlich wird die *Kumulierte Verzögerung* D als makroskopische Kenngröße für die Verzögerung eines Fahrzeugs entlang der Trajektorie herangezogen. In völliger Analogie zur Kumulierten Beschleunigung (Gl. (6.1)) [70] ist die Kumulierte Verzögerung D_j pro Streckenlänge L_j definiert als

$$D_j = \frac{1}{L_j} \sum_{n=1}^{N-1} [-(v_{n+1} - v_n)] \theta_n^- \quad (6.1)$$

mit der Anzahl N an Zeitschritten, an denen sich das Fahrzeug auf der Strecke j befindet, und

$$\theta_n^- = \Theta[-(v_{n+1} - v_n) - \Delta v], \quad (6.2)$$

mit der Heaviside-Funktion $\Theta[x]$, und $\Delta v = 0,5$ km/h.

Zur Berechnung der Abhängigkeit der relativen elektrischen Energie von mittlerer Geschwindigkeit V und Kumulierter Beschleunigung A bzw. Kumulierter Verzögerung D wird die mikroskopische Matrix für ein Elektrofahrzeug (Abb. 5.3) in zwei Teilmatrizen unterteilt (vgl. Abb. 6.2): eine Teilmatrix, die alle Geschwindigkeits-Beschleunigungs-Paare mit nicht-negativer Beschleunigung enthält, und eine zweite Matrix mit allen Paaren, bei denen die Beschleunigung negativ ist. Es ist zu beachten, dass alle Energiewerte bei nicht-negativen Beschleunigungen auch nicht-negativ sind (Energieverbrauch), es aber bei negativer Beschleunigung sowohl negative als auch nicht-negative Energiewerte (Verbrauch und Rekuperation) gibt.

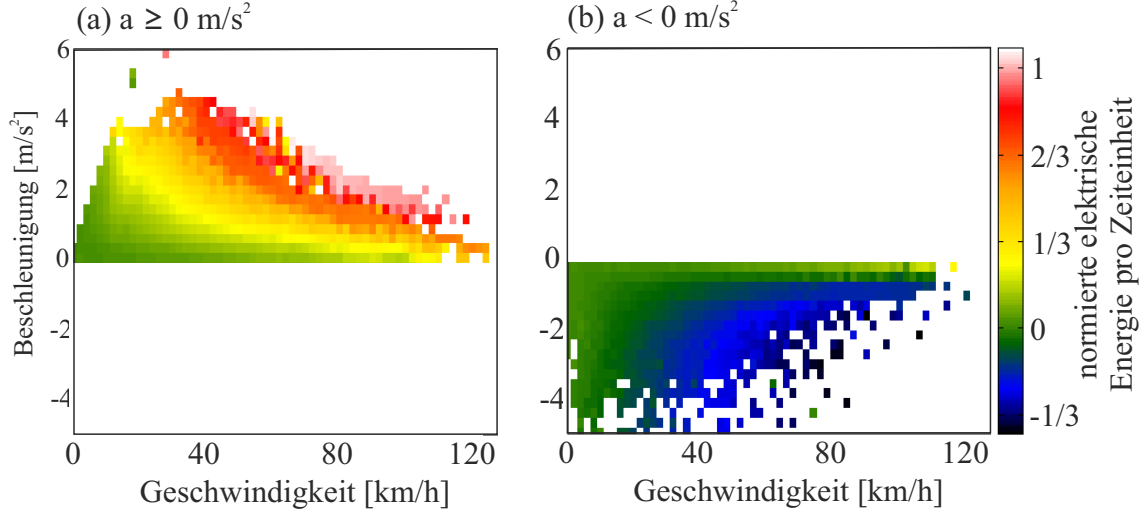


Abbildung 6.2: Aufteilung der mikroskopischen Energiematrix für ein Elektrofahrzeug (Abb. 5.3) in (a) eine Matrix für nicht-negative Beschleunigungswerte und (b) eine zweite Matrix für negative Werte der Beschleunigung.

Beide mikroskopischen Matrizen werden auf dieselben simulierten Trajektorien angewendet, die auch bei den Berechnungen für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor benutzt worden sind. In einem Fall werden die Energiewerte in Klassen der mittleren Geschwindigkeit V und der Kumulierten Beschleunigung A aggregiert, im anderen Fall in Klassen gemäß V und Kumulierter Verzögerung D . Pro Klasse wird der Mittelwert der relativen elektrischen Energie berechnet. Wie bei der Erstellung der makroskopischen Matrix M_C für Verbrennerfahrzeuge wurden für die Berechnung von V , A und D die sekundlichen Positionsdaten der simulierten Fahrzeuge auf $\Delta t = 5 \text{ s}$ vergrößert. Als Ergebnis erhalten wir zwei makroskopische Matrizen M_{E1} und M_{E2} .

Die makroskopische Matrix M_{E1} ist in Abb. 6.3 zu sehen [64]. Bezüglich der Abhängigkeit der relativen elektrischen Energie E_1 während der Fahrtanteile mit nicht-negativer Beschleunigung von der Kumulierten Beschleunigung A gilt: Für ein gegebenes Intervall mittlerer Geschwindigkeiten wächst die verbrauchte elektrische Energie E_1 mit A . Die Abhängigkeit der verbrauchten elektrischen Energie E_1 von der mittleren Geschwindigkeit V ist nicht in allen Fällen monoton: Für das Intervall $(80;120]$ (in h^{-1}) der Kumulierten Beschleunigung steigt gemäß M_{E1} die verbrauchte elektrische Energie E_1 vom Intervall mittlerer Geschwindigkeiten $(10;15]$ zum Intervall $(5;10]$, während sie für die A -Intervalle $(120;160]$ und $(160;200]$ (in h^{-1}) jeweils für das V -Intervall $(10;15]$ größer ist als für $(5;10]$ (in km/h). Dabei ist zu beachten, dass auch dann, wenn ein Fahrzeug mit negativer Beschleunigung fährt, insbesondere bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten, Energie verbraucht werden kann. Dieser Energieverbrauch bei negativer Beschleunigung wird nicht von der makroskopischen Matrix M_{E1} erfasst, sondern von M_{E2} .

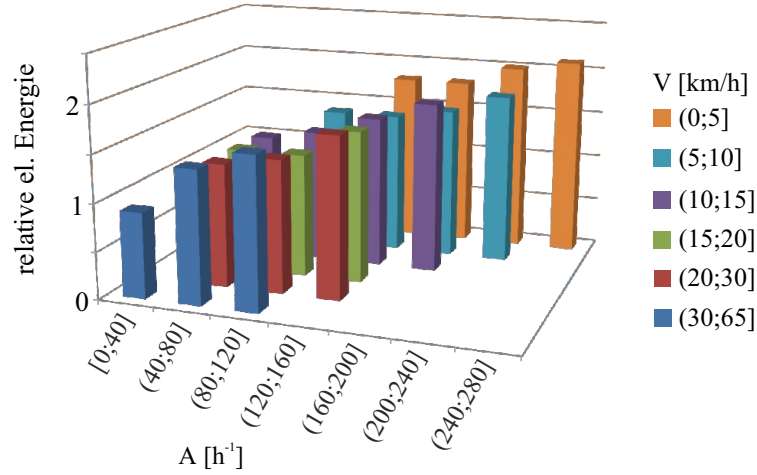


Abbildung 6.3: Makroskopische Energiematrix M_{E1} für Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb, die die Abhängigkeit der mittleren relativen Energiebilanz bei Fahrt mit nicht-negativer Beschleunigung von der mittleren Geschwindigkeit V und der Kumulierten Beschleunigung A darstellt [64].

Die makroskopische Matrix M_{E2} ist in Abb. 6.4 gezeigt [64]. Für mittlere Geschwindigkeiten über 15 km/h ist die mittlere elektrische Energie E_2 während der Fahrtanteile mit negativer Beschleunigung fast immer negativ, mit Ausnahme eines Eintrags mit dem Wert null. Das heißt, während der Fahrtanteile mit negativer Beschleunigung überwiegt in der Energiebilanz die rekuperierte elektrische Energie gegenüber der verbrauchten elektrischen Energie. Dagegen ist für mittlere Geschwindigkeiten unter 15 km/h die mittlere elektrische Energie fast immer positiv, mit Ausnahme zweier Einträge mit dem Wert null. Hier überwiegt in der Energiebilanz auch während der Fahrtanteile mit negativer Beschleunigung der Verbrauch elektrischer Energie gegenüber der Rekuperation. Die Abhängigkeit der relativen elektrischen Energie E_2 von der Kumulierten Verzögerung D ist nur schwach ausgeprägt: Für ein gegebenes Intervall mittlerer Geschwindigkeiten beträgt die Differenz der relativen elektrischen Energie E_2 zwischen verschiedenen D -Intervallen maximal 0,1, was dem kleinsten auflösbaren Betrag auf der Skala relativer elektrischer Energien entspricht.

Die in der Bilanz resultierende relative elektrische Energie E^{rel} pro Streckenabschnitt berechnet sich gemäß der Formel

$$E^{\text{rel}} = E_1(V, A) + E_2(V, D), \quad (6.3)$$

wobei $E_1(V, A)$ aus der makroskopischen Matrix M_{E1} und $E_2(V, D)$ aus der makroskopischen Matrix M_{E2} abgelesen wird. Beim Vergleich der Abbildungen 6.3 und 6.4 fällt auf, dass sich die beiden gezeigten makroskopischen Matrizen in der Höhe der Balken unterscheiden: Matrix M_{E1} enthält Werte von 0,9 bis 2,1, wogegen Matrix M_{E2} Werte von -0,2 bis 0,5 enthält. Das heißt, dass die elektrische Energie, die bei Fahrt mit nicht-negativer

Beschleunigung verbraucht wird, mit einem deutlich größeren Anteil zur Energiebilanz E^{rel} beiträgt als die elektrische Energie, die während der Fahrt mit negativer Beschleunigung verbraucht oder rekuperiert wird.

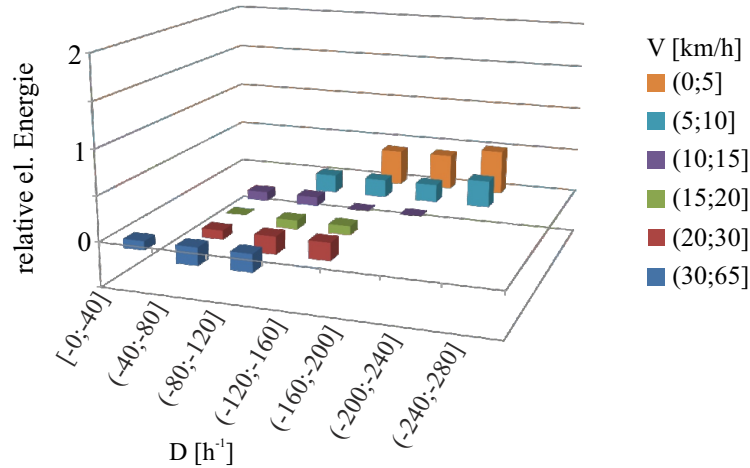


Abbildung 6.4: Makroskopische Energiematrix M_{E2} für Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb, die die Abhängigkeit der mittleren relativen Energiebilanz bei Fahrt mit negativer Beschleunigung von der mittleren Geschwindigkeit V und der Kumulierten Verzögerung D darstellt [64].

Ein Vergleich der relativen elektrischen Energie gemäß Gl. (6.3) mit dem relativen Verbrauch, der aus den Einträgen der Matrix M_C (vgl. Abb. 6.1) hervorgeht, ergibt, dass der relative Kraftstoffverbrauch bei geringen Geschwindigkeiten betragsmäßig deutlich größer ist als die relative elektrische Energie [64]: Während bei mittleren Geschwindigkeiten aus dem Intervall (0;5] und Kumulierten Beschleunigungen aus dem Intervall (240;280] der relative Kraftstoffverbrauch den Wert 5,6 annimmt, ergibt sich für dieselbe Kombination von mittlerer Geschwindigkeit und Kumulierter Beschleunigung, abhängig von der Kumulierten Verzögerung, eine relative elektrische Energie von 2,3 oder 2,2. Auch bei mittleren Geschwindigkeiten zwischen 10 km/h und 15 km/h, die wir in Abschnitt 5.4 betrachtet haben, ist der relative Verbrauch mit Werten von 2,2 bis 3,1 deutlich größer als die relative elektrische Energie E^{rel} , die dort für alle Kombinationen von Kumulierter Beschleunigung und Verzögerung Werte zwischen 1,3 und 1,9 annimmt. Der Vergleich zwischen relativem Verbrauch und relativer elektrischer Energie zeigt, dass der relative Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor stärker auf Verkehrsstörungen reagiert als die relative Energieeffizienz eines Fahrzeugs mit elektrischem Antrieb. Hierbei sind unterschiedliche Datengrundlagen zu beachten (vgl. 5.1.1): die makroskopische Verbrauchsmatrix M_C für Verbrennerfahrzeuge wurde auf der Grundlage einer empirischen mikroskopischen Verbrauchsmatrix für ein Mittelklassefahrzeug erstellt. Dagegen basieren die makroskopischen Energiematrizen M_{E1} und M_{E2} auf einer empirischen mikroskopischen

Matrix, die mit einem Smart Electric Drive gemessen wurde.

6.3 Nutzung im Streckennetz

Wir betrachten ein Straßennetz, in dem einige Fahrzeuge mit Navigationsgeräten ihre anonymisierten GPS-Positionen online an den Verkehrsserver senden (vgl. Abschnitt 3.4) [66, 67]. Auf Basis dieser GPS-Daten werden auf dem Verkehrsserver für jeden Streckenabschnitt die mittlere Geschwindigkeit und die Kumulierte Beschleunigung für alle Fahrzeuge, die GPS-Daten online gesendet haben, berechnet und über ein gegebenes Zeitintervall gemittelt. Werden also für den Streckenabschnitt j der Länge L_j die mittlere Geschwindigkeit V_j und die Kumulierte Beschleunigung A_j ermittelt, so ergibt sich der streckenbezogene Verbrauchsfaktor C_j für diesen Streckenabschnitt gemäß der Formel [66, 67]

$$C_j = \frac{L_j}{1 \text{ km}} C_j^{\text{rel}}(V_j, A_j), \quad (6.4)$$

wobei der relative Verbrauch C_j^{rel} gemäß der Werte von V_j und A_j aus der makroskopischen Verbrauchsmatrix M_C abgelesen wird. Analog berechnet sich die relative elektrische Energie E_j , wobei statt C_j^{rel} die relative elektrische Energie E_j^{rel} gemäß Gl. (6.3) in Gl. (6.4) eingesetzt wird.

6.3.1 Vergleich der schnellsten mit der energieeffizientesten Route

Im Folgenden wird gezeigt, dass sich in einem Straßennetz die Route mit der kürzesten Reisezeit von einem Ort zum anderen von der energieeffizientesten Route mit denselben Start- und Zielorten unterscheiden kann [66, 67]. Dazu betrachten wir die folgende hypothetische Situation in einem städtischen Straßennetz: Um von Punkt A zu Punkt B zu gelangen, kann man zwischen den beiden Routen ACB und ADB wählen (vgl. Abb. 6.5). ACB sei geringfügig länger als ADB. Auf beiden Strecken herrsche übersättigter Verkehr, und die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit sei auf beiden Strecken gleich. Allerdings nehmen wir an, dass sich auf ACB Strukturen des Synchronisierten Verkehrs ausgebildet haben, während man auf ADB klassische Folgen von Moving Queues antrifft. Demnach sei in Übereinstimmung mit Abschnitt 5.3 die Kumulierte Beschleunigung für ADB größer als für ACB. Mögliche Werte der Streckenlänge L_j , der mittleren Geschwindigkeit V_j und der Kumulierten Beschleunigung A_j sind in Abb. 6.5 für beide Strecken angegeben. Zudem nehmen wir der Einfachheit halber an, dass die Kumulierte Verzögerung D_j jeweils betragsmäßig mit A_j übereinstimme.

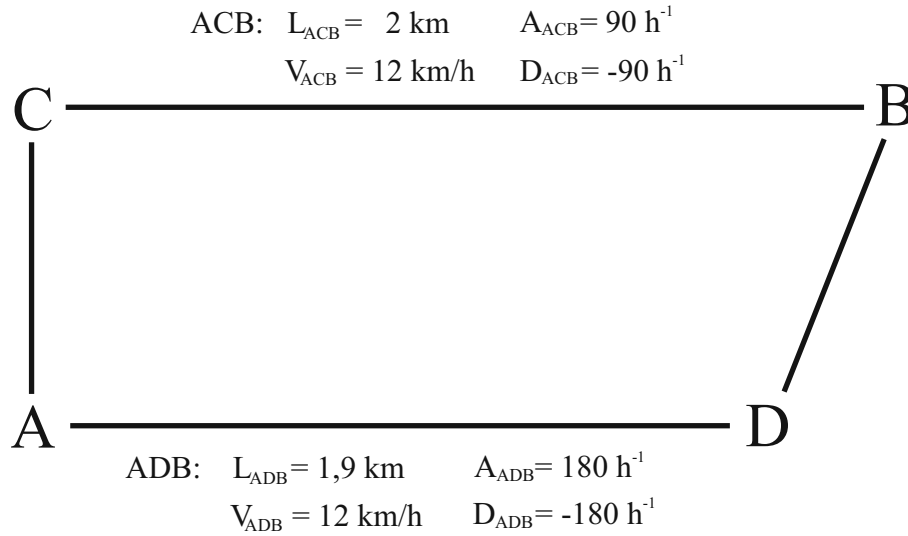


Abbildung 6.5: Skizze eines Ausschnitts eines hypothetischen städtischen Straßennetzes mit zwei Routen ACB und ADB von Punkt A zu Punkt B [66, 67].

Für die oben beschriebene Situation sind in Tabelle 6.1 Reisezeit T_j , relativer Verbrauch C_j^{rel} bzw. relative elektrische Energieeffizienz E_j^{rel} gemäß der makroskopischen Matrizen M_C , M_{E1} und M_{E2} sowie Gl. (6.3) und die streckenbezogenen Faktoren C_j und E_j von Kraftstoffverbrauch und elektrischer Energie gemäß Gl. (6.4) angegeben. ADB ist mit einer um 30 s kürzeren Reisezeit die schnellere Route. Dagegen ist ACB gemäß der Werte von C_j und E_j die energieeffizientere Route [66, 67]. Dies gilt sowohl für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor als auch für Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb.

Tabelle 6.1: Vergleich der Reisezeit T_j , des relativen Verbrauchs C_j^{rel} , des streckenbezogenen Verbrauchsfaktors C_j , der relativen elektrischen Energie E_j^{rel} und des streckenbezogenen Faktors E_j elektrischer Energie für die Strecken ACB und ADB aus dem in Abb. 6.5 gezeigten Beispiel.

Strecke j	ACB	ADB
T_j	600 s	570 s
C_j^{rel}	2,5	3,1
C_j	5	5,89
E_j^{rel}	1,5	1,8
E_j	3	3,42

6.3.2 Vergleich der energieeffizientesten Route für Verbrenner- und Elektrofahrzeuge

Das nun folgende hypothetische Beispiel zeigt, dass die energieeffizienteste Route für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor und Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb in einem innerstädtischen Straßennetz verschieden sein kann. Von Punkt E zu Punkt F gebe es eine direkte Strecke EF und eine deutlich längere Strecke EGF (vgl. Abb. 6.6). Auf EF habe sich bereits ein Einbruch der Geschwindigkeit ereignet, während der Verkehr auf der Strecke EGF noch unversättigt sei. Dieser Situation entsprechend, sind passende Werte von L_j , V_j und A_j für beide Strecken EF und EGF angegeben. Wieder gehen wir der Einfachheit halber davon aus, dass D_j jeweils betragsmäßig mit A_j übereinstimme.

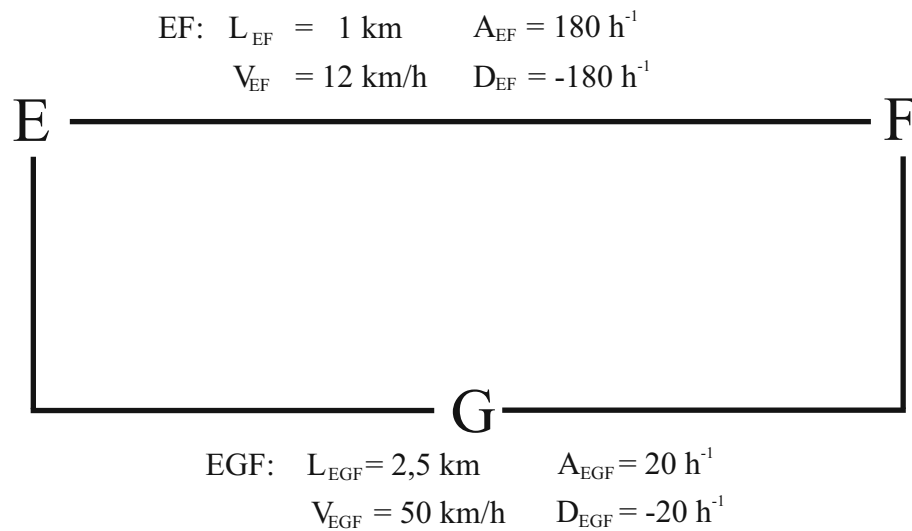


Abbildung 6.6: Skizze eines Ausschnitts eines hypothetischen städtischen Straßennetzes mit zwei Routen EF und EGF von Punkt E zu Punkt F.

Die resultierenden Werte von T_j , C_j^{rel} , C_j , E_j^{rel} und E_j gemäß der makroskopischen Matrizen M_C , M_{E1} , M_{E2} und der Gleichungen (6.3) und (6.4) sind in Tabelle 6.2 aufgelistet. Die Reisezeit T_j ist für den längeren, aber unversättigten Abschnitt EGF deutlich niedriger als für den übersättigten kurzen Abschnitt EF. Ebenso ist der streckenbezogene Verbrauchsfaktor C_{EF} für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor größer als C_{EGF} . Hingegen erhalten wir beim streckenbezogenen Faktor elektrischer Energie einen größeren Wert E_{EGF} als E_{EF} . Also unterscheidet sich die energieeffizienteste Route für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor hier von der energieeffizientesten Route für ein Fahrzeug mit elektrischem Antrieb. Dieses Beispiel zeigt, dass die Energieeffizienz für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor stärker auf Verkehrsstörungen reagiert als für Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb.

Tabelle 6.2: Vergleich der Reisezeit T_j , des relativen Verbrauchs C_j^{rel} , des streckenbezogenen Verbrauchsfaktors C_j , der relativen elektrischen Energie E_j^{rel} und des streckenbezogenen Faktors E_j elektrischer Energie für die Strecken EF und EGF aus dem in Abb. 6.6 gezeigten Beispiel.

Strecke j	EF	EGF
T_j	300 s	180 s
C_j^{rel}	3,1	1,1
C_j	3,1	2,75
E_j^{rel}	1,8	0,8
E_j	1,8	2

6.4 Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel wurden makroskopische Energiematrizen vorgestellt, die auf der Grundlage empirischer mikroskopischer Energiematrizen (vgl. Abschnitt 5.1.1) und Fahrzeugtrajektorien aus Verkehrsflusssimulationen erstellt worden sind. Die makroskopische Verbrauchsmatrix für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor bildet den relativen Verbrauch in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit V und der Kumulierten Beschleunigung A ab. Für die elektrische Energie wurden zwei makroskopische Energiematrizen erstellt. Anhand dieser beiden Matrizen wird die mittlere relative elektrische Energie durch die drei makroskopischen Kenngrößen V , A und Kumulierte Verzögerung D abgebildet. Durch Hinzunahme von D wird berücksichtigt, dass bei Elektrofahrzeugen verbrauchte und rekuperierte Energie in die Energiebilanz eingehen. Die makroskopischen Kenngrößen V , A und D lassen sich einfach auf der Grundlage anonymisierter Online-GPS-Daten, die von Navigationssystemen an einen Verkehrsserver übertragen werden, berechnen. Daher sind die makroskopischen Energiematrizen für die Online-Berechnung der streckenabhängigen Energieeffizienz in innerstädtischen Straßennetzen geeignet. Anhand hypothetischer Situationen in innerstädtischen Straßennetzen wurden Alternativrouten hinsichtlich der Reisezeiten und der Energieeffizienz für Verbrenner- und Elektrofahrzeuge verglichen. Aus den makroskopischen Matrizen und den hypothetischen Fallbeispielen ihrer Anwendung in innerstädtischen Straßennetzen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen [64, 66, 67].

1. Bei gegebener mittlerer Geschwindigkeit steigt der Kraftstoffverbrauch und die verbrauchte elektrische Energie mit zunehmender Kumulierter Beschleunigung.
2. Bei gegebener Kumulierter Beschleunigung steigt der Kraftstoffverbrauch von Verbrennerfahrzeugen mit abnehmender mittlerer Geschwindigkeit. Meistens gilt dies auch für die in der Bilanz umgesetzte elektrische Energie bei Elektrofahrzeugen.

6 Online-Berechnung der streckenabhängigen Energieeffizienz...

3. Der Beitrag der Rekuperation zur elektrischen Energiebilanz von Elektrofahrzeugen ist bei niedrigen mittleren Fahrzeuggeschwindigkeiten deutlich geringer als der Beitrag des Verbrauchs elektrischer Energie.
4. Die Auswirkung von übersättigtem Verkehr auf die Energieeffizienz von Fahrzeugen ist größer für Verbrennerfahrzeuge als für Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb.
5. In einem innerstädtischen Straßennetz kann die Route mit der kürzesten Reisezeit von der energieeffizientesten Route zwischen zwei Punkten verschieden sein.
6. In einem innerstädtischen Straßennetz kann die energieeffizienteste Route zwischen zwei Punkten für Verbrennerfahrzeuge und Elektrofahrzeuge verschieden sein.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Verständnis der physikalischen Eigenschaften des Straßenverkehrs ist sowohl von hoher verkehrswissenschaftlicher und physikalischer Bedeutung als auch von großer praktischer Relevanz für Anwendungen in der Verkehrstechnik. Mit der vorliegenden Arbeit wurde eine empirische Analyse der räumlich-zeitlichen Phänomene im übersättigten innerstädtischen Verkehr vorgelegt. Zudem wurde der Zusammenhang empirischer innerstädtischer Verkehrsmuster mit dem Kraftstoffverbrauch und der Energieeffizienz von Fahrzeugen untersucht.

7.1 Ergebnisse der Arbeit

Anonymisierte GPS-Daten, die von Navigationsgeräten im realen Verkehr auf verschiedenen Streckenabschnitten in mehreren Jahren gemessen wurden, sind analysiert worden. Durch diese Analyse konnten empirische zeitlich-räumliche Verkehrsmuster des übersättigten Verkehrs identifiziert und anhand zahlreicher Beispiele belegt werden.

So lässt sich der übersättigte Verkehr nach Einbruch der Geschwindigkeit durch zwei grundlegende qualitativ verschiedene Verkehrsmuster klassifizieren: regelmäßigen Folgen von Moving Queues, wie sie in der klassischen Theorie bekannt sind, und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs, die erst 2013 für den übersättigten Verkehr an einer Lichtsignalanlage anhand von Simulationen vorhergesagt wurden [22]. Im Gegensatz zu den Folgen von Moving Queues, in denen die Fahrzeuge mehrfach entlang des Streckenabschnittes anhalten, gibt es im Synchronisierten Verkehr keine Anhaltvorgänge. Quantitativ lässt sich der Unterschied zwischen Folgen von Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs anhand der betragsmäßigen Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen aufeinanderfolgenden GPS-Messungen erfassen. Sowohl Mittelwerte als auch Standardabweichungen dieser Geschwindigkeitsdifferenzen sind entlang Trajektorien von Fahrzeugen, die Folgen von Moving Queues durchfahren, größer. Typischerweise besteht übersättigter Verkehr nach Einbruch der Geschwindigkeit aus vielfältigen Mischungen von Moving Queues und Synchronisiertem Verkehr. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das zeitlich-räumliche Abwechseln zwischen Moving Queues und Synchronisiertem Verkehr in Datenbeispielen beobachtet, auch konnte für mehrspurige Straßen die gleichzeitige Existenz von Moving Queues und Synchronisiertem Verkehr auf verschiedenen Spuren belegt werden. Die Daten der stationären Detektoren belegen, dass der Verkehrsfluss, während die genannten Verkehrsmuster im übersättigten Verkehr nach Einbruch der Geschwindigkeit auftreten, so groß sein kann wie im untersättigten Verkehr vor Einbruch der Geschwindigkeit.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Werden an einem Streckenabschnitt im übersättigten Verkehr neben der eingebrochenen Geschwindigkeit auch Verkehrsflüsse gemessen, die deutlich niedriger sind als vor dem Verkehrszusammenbruch, so wird in den mikroskopischen Verkehrsdaten typischerweise eine Mega-Queue beobachtet. Insbesondere kann beim gleichzeitigen Einbruch von Geschwindigkeit und Verkehrsfluss die Ausbreitung einer Mega-Queue über den Streckenabschnitt in Raum und Zeit verfolgt werden. Bei der Fahrt in einer Mega-Queue wechseln sich Stillstände und kurze Zeitintervalle der Fortbewegung in unregelmäßiger zeitlich-räumlicher Folge ab. Die Reisezeit eines Fahrzeugs in einer Mega-Queue ist im Vergleich zu Folgen von Moving Queues und Strukturen des Synchronisierten Verkehrs deutlich erhöht.

Mit dem Ergebnis, dass übersättigter Verkehr nach Einbruch der Geschwindigkeit sowohl aus Synchronisiertem Verkehr als auch aus Moving Queues besteht, ergibt sich die praktische Frage, wie sich diese empirisch belegten Verkehrsmuster auf die Energieeffizienz von Fahrzeugen auswirken. Zu ihrer Beantwortung wurde die Kumulierte Beschleunigung als makroskopische Kenngröße herangezogen. Für empirische GPS-Daten wurde gezeigt, dass die Kumulierte Beschleunigung für Moving Queues deutlich größer ist als für Strukturen des Synchronisierten Verkehrs, auch bei ähnlichen mittleren Fahrzeuggeschwindigkeiten in beiden Verkehrsmustern. Zudem wurde anhand empirischer mikroskopischer Energiematrizen aus Feldversuchsdaten mit einem Verbrenner- und einem Elektrofahrzeug und Fahrzeugtrajektorien aus Verkehrsflusssimulationen gezeigt, dass der Energieverbrauch von Fahrzeugen mit zunehmender Kumulierter Beschleunigung anwächst. Verbindet man diese Abhängigkeit des Energieverbrauchs von der Kumulierten Beschleunigung mit dem empirischen Befund, dass die Kumulierte Beschleunigung für Folgen von Moving Queues größer ist als für Strukturen des Synchronisierten Verkehrs, erhält man die folgende Schlussfolgerung: Die Energieeffizienz im übersättigten Verkehr kann verbessert werden, wenn der übersättigte Verkehr nur aus Strukturen des Synchronisierten Verkehrs besteht und nicht aus Folgen von Moving Queues.

Es wurden makroskopische Energiematrizen für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor und Elektrofahrzeuge zur Berechnung energieeffizienter Routen in einem innerstädtischen Straßennetz entwickelt. Die makroskopische Verbrauchsmatrix für das Verbrennerfahrzeug bildet den relativen Verbrauch pro Streckenabschnitt in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit und der Kumulierten Beschleunigung ab. Zusätzlich zu diesen Kenngrößen wurde für Energiebilanz eines Fahrzeugs mit elektrischem Antrieb die Kumulierte Verzögerung mit in Betracht gezogen, um die Rekuperation elektrischer Energie beim Bremsen abzubilden.

7.2 Ausblick

Anonymisierte GPS-Daten aus Navigationsgeräten, wie sie in dieser Arbeit verwendet wurden, sind heute für zufällig im Verkehrsfluss verteilte Fahrzeuge verfügbar. Es ist zu

erwarten, dass durch eine vollständige hochaufgelöste Erfassung des Verkehrsflusses in der Zukunft das Verständnis der Physik des innerstädtischen Verkehrs weiter verbessert werden kann. Hierzu kann insbesondere die Auswertung von Videokamerabildern beitragen. Solche vollständigen empirischen Datensätze von Einzelfahrzeugtrajektorien liegen bislang nur für kurze Zeitabschnitte vor [88]. Mit weiteren geeigneten vollständigen Sätzen von Fahrzeugtrajektorien könnten das Abwechseln von Synchronisiertem Verkehr und Moving Queues im übersättigten Verkehr und die Rolle von Spurwechseln bei der zeitlich-räumlichen Entwicklung von Verkehrsmustern detaillierter analysiert werden. Darüber hinaus können vollständige mikroskopische Datensätze auch empirische Erkenntnisse über die zeitlich-räumliche Struktur des untersättigten Verkehrs und insbesondere über den Übergang vom untersättigten zum übersättigten Verkehr liefern. So könnte die Kerner'sche Drei-Phasen-Theorie des Verkehrszusammenbruchs an einer Lichtsignalanlage [34–36] empirisch überprüft werden.

Als praktisch verwendbares Ergebnis dieser Arbeit können die makroskopischen Energiematrizen zur Bestimmung energieeffizienter Routen in der Navigation und im innerstädtischen Verkehrsmanagement eingesetzt werden. So wurden makroskopische Energiematrizen für Verbrenner- und Elektrofahrzeug im Rahmen des Forschungsprojektes UR:BAN [89] an die Projektpartner weitergereicht [90, 91]. Im Online-Betrieb des Verkehrsmanagements der Stadt Düsseldorf wurden die makroskopischen Matrizen getestet und zur Bestimmung energieeffizienter Routen für Verbrenner- und Elektrofahrzeuge im Düsseldorfer Straßennetz eingesetzt. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass sich zwischen zwei Punkten des Straßennetzes in bestimmten Verkehrssituationen die energieeffizienteste Route für ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor von der energieeffizientesten Route für ein Fahrzeug mit elektrischem Antrieb unterscheidet. Die makroskopische Matrix für Verbrennerfahrzeuge wurde in einer Offenlegungsschrift aufgegriffen [92]. Neben dem Einsatz im Verkehrsmanagement können die Ergebnisse dieser Arbeit auch bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen bzw. automatisch fahrenden Fahrzeugen berücksichtigt werden [93]. Die Parametrisierung dieser Systeme kann so gestaltet werden, dass die Bildung von Synchronisiertem Verkehr gegenüber Folgen von Moving Queues begünstigt wird.

Literatur

- [1] B. S. Kerner. “A Theory of Congested Traffic Flow”. In: *Proceedings of the Third International Symposium on Highway Capacity*. Hrsg. von R. Rysgaard. Road Directorate, Ministry of Transport – Denmark, 1998, S. 621–641.
- [2] B. S. Kerner. “Experimental features of self-organization in traffic flow”. In: *Physical Review Letters* 81.17 (1998), S. 3797.
- [3] B. S. Kerner. “Traffic Flow: Experiment and Theory”. In: *Traffic and Granular Flow '97*. Hrsg. von M. Schreckenberg und D. E. Wolf. Springer, Singapore Pte. Ltd, 1998, S. 239–267.
- [4] B. S. Kerner. “The physics of traffic”. In: *Physics World* 12.8 (1999), S. 25–30.
- [5] B. S. Kerner. “Theory of Congested Traffic Flow: Self-Organization without Bottlenecks”. In: *Transportation and Traffic Theory*. Hrsg. von A. Ceder. Elsevier Science, London, 1999, S. 147–171.
- [6] B. S. Kerner. “Congested traffic flow: observations and theory”. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1678.1 (1999), S. 160–167.
- [7] B. S. Kerner. “Theory of Breakdown Phenomenon at Highway Bottlenecks”. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1710 (2000), S. 136–144.
- [8] B. S. Kerner. “Phase Transitions in Traffic Flow”. In: *Traffic and Granular Flow '99: Social, Traffic and Granular Dynamics*. Hrsg. von D. Helbing, H. J. Herrmann, M. Schreckenberg und D. E. Wolf. Springer Heidelberg Berlin, 2000, S. 253–284.
- [9] B. S. Kerner. “Experimental features of the emergence of moving jams in free traffic flow”. In: *Journal of Physics A: Mathematical and General* 33 (2000), S. L221 –L228.
- [10] B. S. Kerner. “Complexity of Synchronized Flow and Related Problems for Basic Assumptions of Traffic Flow Theories”. In: *Networks and Spatial Economics* 1 (2001), S. 35–76.
- [11] B. S. Kerner. “Synchronized flow as a new traffic phase and related problems for traffic flow modelling”. In: *Mathematical and Computer Modelling* 35.5 (2002), S. 481–508.

- [12] B. S. Kerner. “Empirical macroscopic features of spatial-temporal traffic patterns at highway bottlenecks”. In: *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 65 (2002), S. 046138.
- [13] B. S. Kerner. “Theory of congested highway traffic: Empirical features and methods of tracing and prediction”. In: *Traffic and Transportation Theory in the 21st Century: Proceedings of the 15th International Symposium on Traffic and Transportation Theory*. Hrsg. von M. A. P. Taylor. Elsevier Science, Amsterdam, 2002, S. 417–439.
- [14] B. S. Kerner. “Empirical features of congested patterns at highway bottlenecks”. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1802 (2002), S. 145–154.
- [15] B. S. Kerner. “Three-Phase-Traffic Theory”. In: *Traffic and Granular Flow '01*. Hrsg. von M. Schreckenberg, Y. Sugiyama und D. E. Wolf. Springer Berlin, 2003, S. 13–50.
- [16] B. S. Kerner. “Three-phase traffic theory and highway capacity”. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 333 (2004).
- [17] B. S. Kerner. *The Physics of Traffic*. Springer Berlin New York, 2004.
- [18] B. S. Kerner. *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-Phase Traffic Theory*. Springer Berlin New York, 2009.
- [19] M. Treiber und A. Kesting. *Verkehrsdynamik und -simulation. Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2010. ISBN: 9783642052279. URL: <http://www.springer.com/series/1183>.
- [20] B. S. Kerner, H. Rehborn, R.-P. Schäfer, S. L. Klenov, J. Palmer, S. Lorkowski und N. Witte. “Traffic dynamics in empirical probe vehicle data studied with three-phase theory: Spatiotemporal reconstruction of traffic phases and generation of jam warning messages”. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 392.1 (2013), S. 221–251. DOI: 10.1016/j.physa.2012.07.070.
- [21] B. S. Kerner. “A theory of traffic congestion at heavy bottlenecks”. In: *Journal of Physics A: Mathematical and General* 41.21 (2008). DOI: 10.1088/1751-8113/41/21/215101. arXiv: 0712.1728.
- [22] B. S. Kerner, S. L. Klenov, G. Hermanns, P. Hemmerle, H. Rehborn und M. Schreckenberg. “Synchronized flow in oversaturated city traffic”. In: *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 88.5 (2013), S. 054801. DOI: 10.1103/PhysRevE.88.054801.
- [23] L. Elefteriadou, R. P. Roess und W. R. McShane. “Probabilistic nature of breakdown at freeway merge junctions”. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1484 (1995), S. 80–89.

- [24] W. Brilon, M. Regler und J. Geistefeldt. “Zufallscharakter der Kapazität von Autobahnen und praktische Konsequenzen (Teil 2)”. In: *Straßenverkehrstechnik* 4 (2005).
- [25] W. Brilon, M. Regler und J. Geistefeldt. “Zufallscharakter der Kapazität von Autobahnen und praktische Konsequenzen (Teil 1)”. In: *Straßenverkehrstechnik* 3 (2005).
- [26] M. Lorenz und L. Elefteriadou. “Defining freeway capacity as function of breakdown probability”. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1776 (2001), S. 43–51.
- [27] B. S. Kerner. “Criticism of generally accepted fundamentals and methodologies of traffic and transportation theory: A brief review”. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 392.21 (2013), S. 5261–5282. DOI: 10.1016/j.physa.2013.06.004.
- [28] B. S. Kerner. “Failure of classical traffic flow theories: Stochastic highway capacity and automatic driving”. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 450 (2016), S. 700–747. DOI: DOI:10.1016/j.physa.2016.01.034.
- [29] S. Green, W. Adams, J. Dickinson, R. Smeed, N. Seymer, S. Chamberlain, D. A.D. C. Bellamy, J. G. Wardrop, C. P. Andren, C. Charlesworth und L. Champion. “Discussion. Working capacity of roads.” In: *ICE Proceedings: Engineering Divisions* 4.5 (1955). Hrsg. von T. Telford, S. 673–696.
- [30] D. C. Gazis und R. B. Potts. *The oversaturated intersection*. No. RC-929. 1963.
- [31] F. Dion, H. Rakha und Y. S. Kang. “Comparison of delay estimates at under-saturated and over-saturated pre-timed signalized intersections”. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 38.2 (2004), S. 99–122. DOI: 10.1016/S0191-2615(03)00003-1.
- [32] D. Helbing. “Derivation of a fundamental diagram for urban traffic flow”. In: *European Physical Journal B* 70.2 (2009), S. 229–241. DOI: 10.1140/epjb/e2009-00093-7. arXiv: 0807.1843.
- [33] B. S. Kerner, S. L. Klenov und M. Schreckenberg. “Traffic breakdown at a signal: classical theory versus the three-phase theory of city traffic”. In: *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2014.3 (2014), P03001. DOI: 10.1088/1742-5468/2014/03/P03001.
- [34] B. S. Kerner. *Theory of self-organized traffic at light signal*. 2012. arXiv: 1211.2535. URL: <http://arxiv.org/abs/1211.2535>.
- [35] B. S. Kerner. “The physics of green-wave breakdown in a city”. In: *EPL (Europhysics Letters)* 102.2 (2013), S. 28010. DOI: 10.1209/0295-5075/102/28010.

- [36] B. S. Kerner. “Three-phase theory of city traffic: Moving synchronized flow patterns in under-saturated city traffic at signals”. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 397 (2014), S. 76–110. DOI: 10.1016/j.physa.2013.11.009.
- [37] F. V. Webster. *Traffic Signal Settings*. Road Research Laboratory Technical Paper No. 39, 1958.
- [38] G. F. Newell. “Approximation methods for queues with application to the fixed-cycle traffic light”. In: *Siam Review* 7.2 (1965), S. 223–240.
- [39] D. I. Robertson. *TRANSYT: a traffic network study tool. Transport and Road Research Laboratory Report LR 253*. Crowthorne: TRL, 1969.
- [40] G. F. Newell. *Applications of Queueing Theory*. London: Chapman und Hall, 1982.
- [41] *Highway Capacity Manual. Special Report 209. Third Edition*. Third Edit. Washington D.C.: Transportation Research Board. National Research Council, 1998. ISBN: 0-30906450-3.
- [42] N. H. Gartner und C. Stamatiadis. “Traffic Networks, Optimization and Control of Urban”. In: *Meyers R. A. (Ed.): Encyclopedia of Complexity and System Science, Springer*. 2009, S. 9470–9500.
- [43] N. Geroliminis und A. Skabardonis. “Identification and analysis of queue spillovers in city street networks”. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 12.4 (2011), S. 1107–1115. DOI: 10.1109/TITS.2011.2141991.
- [44] B. S. Kerner und S. L. Klenov. “A microscopic model for phase transitions in traffic flow”. In: *Journal of Physics A: Mathematical and General* 35.3 (2002), S. L31–L43.
- [45] B. S. Kerner und S. L. Klenov. “A microscopic theory of spatial-temporal congested traffic patterns at highway bottlenecks”. In: *Phys. Rev. E* 68.3 (2003), S. 036130.
- [46] G. Hermanns, P. Hemmerle, H. Rehborn, M. Koller, B. S. Kerner und M. Schreckenberg. “Microscopic Simulation of Synchronized Flow in Oversaturated City Traffic: Effect of Driver’s Speed Adaptation”. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2490 (2015), S. 47–55.
- [47] B. S. Kerner, P. Hemmerle, M. Koller, G. Hermanns, S. L. Klenov, H. Rehborn und M. Schreckenberg. “Empirical synchronized flow in oversaturated city traffic”. In: *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 90.3 (2014), S. 032810. DOI: 10.1103/PhysRevE.00.002800.
- [48] M. Koller, H. Rehborn, B. S. Kerner, G. Hermanns und M. Schreckenberg. “Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs an Lichtsignalanlagen”. In: *Straßenverkehrstechnik* 11 (2013), S. 699–706.
- [49] M. Koller. “Kraftstoffmehrverbrauch auf Basis dynamischer Verkehrslagen”. Diss. Eberhard Karls Universität Tübingen, 2015.

- [50] N. Geroliminis und M. Kuwahara. “The use of telematics to monitor traffic in urban areas: theory and applications”. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC* (2008), S. 748–753. DOI: 10.1109/ITSC.2008.4732526.
- [51] A. H. F. Chow, A. Santacreu, I. Tsapakis und G. Tanasaranond. “Empirical assessment of urban traffic congestion”. In: *Journal of Advanced Transportation* 48.8 (2014), S. 1000–1016. DOI: 10.1002/atr.
- [52] J. Dong und H. S. Mahmassani. “Flow Breakdown and Travel Time Reliability”. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2124 (2009), S. 203–212. DOI: 10.3141/2124-20.
- [53] X. Guochang. *GPS: theory, algorithms and applications*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [54] S. Breitenberger, B. Grüber, M. Neuherz und R. Kates. “Traffic information potential and necessary penetration rates”. In: *Traffic Engineering and Control* 45.11 (2004), S. 396–401.
- [55] M. Sarvi, R. Horiguchi, M. Kuwahara, Y. Shimizu, A. Sato und Y. Sugisaki. “A Methodology To Identify Traffic Condition Using Intelligent Probe Vehicles”. In: *10th ITS World Congress, Madrid, Proceedings*. 2003, S. 17–21.
- [56] R.-P. Schäfer, K.-U. Thiessenhusen und P. Wagner. “A Traffic Information System By Means of Real-Time Floating-Car Data”. In: *ITS world congress* 14 (2002).
- [57] C. E. White, D. Bernstein und A. L. Kornhauser. “Some map matching algorithms for personal navigation assistants”. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 8.1 (2000), S. 91–108. DOI: 10.1016/S0968-090X(00)00026-7.
- [58] M. Barth, F. An, J. Norbeck und M. Ross. “Modal Emissions Modeling: A Physical Approach”. In: *Transportation Research Record* 1520.1 (1996), S. 81–88. DOI: 10.3141/1520-10.
- [59] K. Ahn, H. Rakha, A. Trani und M. Van Aerde. “Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels”. In: *Journal of Transportation Engineering* 128.2 (2002), S. 182–190. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:2(182).
- [60] S. Yang, C. Deng, T. Tang und Y. Qian. “Electric vehicle’s energy consumption of car-following models”. In: *Nonlinear Dynamics* 71.1-2 (2013), S. 323–329. DOI: 10.1007/s11071-012-0663-0.
- [61] H. Engels. *CAN-Bus*. Franzis, Poing, 2000. ISBN: 3772351464.
- [62] H. C. Frey, K. Zhang und N. M. Rouphail. “Fuel use and emissions comparisons for alternative routes, time of day, road grade, and vehicles based on in-use measurements”. In: *Environmental Science and Technology* 42.7 (2008), S. 2483–2489. DOI: 10.1021/es702493v.

- [63] K. Boriboonsomsin und M. Barth. “Impacts of road grade on fuel consumption and carbon dioxide emissions evidenced by use of advanced navigation systems”. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2139 (2009), S. 21–30.
- [64] P. Hemmerle, M. Koller, G. Hermanns, M. Schreckenberg, H. Rehborn und B. S. Kerner. “Impact of Synchronised Flow in Oversaturated City Traffic on Energy Efficiency of Conventional and Electrical Vehicles”. In: *Traffic and Granular Flow 2015 (angenommen)*. 2016.
- [65] P. Hemmerle, G. Hermanns, M. Koller, H. Rehborn, B. S. Kerner und M. Schreckenberg. “Macroscopic Consumption Matrix for On-Line Energy-efficient Route Guidance”. In: *Transportation Research Board 2015 Annual Meeting, Proceedings*. Washington D.C., 2015.
- [66] P. Hemmerle, M. Koller, H. Rehborn, B. S. Kerner und M. Schreckenberg. “Fuel consumption in empirical synchronised flow in urban traffic”. In: *IET Intelligent Transport Systems* (2015). DOI: 10.1049/iet-its.2015.0014.
- [67] P. Hemmerle, G. Hermanns, M. Koller, H. Rehborn, B. S. Kerner und M. Schreckenberg. “Effect of Synchronized Flow on On-line Energy-efficient Route Guidance in an Urban Road Network”. In: *Mobil.TUM 2015 - International Scientific Conference on Mobility and Transport Technologies, Solutions and Perspectives for Intelligent Transport Systems, Proceedings*. München, 2015.
- [68] M. Koller, P. Hemmerle, H. Rehborn, B. S. Kerner, M. Schreckenberg und G. Hermanns. “Mehrverbrauch im gestauten Stadtverkehr”. In: *Straßenverkehrstechnik* 59.12 (2015), S. 820–824.
- [69] R. Akcelik. *Progress in Fuel Consumption Modelling for Urban Traffic Management*. Australian Road Research Board, 1983.
- [70] B. S. Kerner. “Cumulated vehicle acceleration”. In: *Traffic Engineering and Control* 55.4 (2014), S. 139–141.
- [71] H. C. Watson. *Effects of a wide range of drive cycles on the emissions from vehicles of three levels of technology*. No. 950221. SAE Technical Paper, 1995.
- [72] G. Wu, K. Boriboonsomsin und M. Barth. “Development and Evaluation of Intelligent Energy Management Strategies for Plug-in Hybrid Electric Vehicles Development and Evaluation of Intelligent Energy Management Strategies for Plug-in Hybrid Electric Vehicles”. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC* 15.3 (2014), S. 1092–1100.
- [73] Y. M. Nie und Q. Li. “An eco-routing model considering microscopic vehicle operating conditions”. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 55 (2013), S. 154–170. DOI: 10.1016/j.trb.2013.06.004.

- [74] C. Osorio und K. Nanduri. “Energy-Efficient Urban Traffic Management: A Microscopic Simulation-Based Approach”. In: *Transportation Science* 49.3 (2015), S. 637–651. DOI: 10.1287/trsc.2014.0554.
- [75] K. S. Nesamani, L. Y. Chu, M. G. McNally und R. Jayakrishnan. “Estimation of Vehicular Emissions by Capturing Traffic Variations”. In: *Atmospheric Environment* 41.14 (2007), S. 2996–3008.
- [76] J. Bandeira, T. G. Almeida, A. J. Khattak, N. M. Rouphail und M. C. Coelho. “Generating emissions information for route selection – experimental monitoring and routes characterization”. In: *Journal of Intelligent Transportation Systems* 17.1 (2013), S. 3–17.
- [77] M. Barth und K. Boriboonsomsin. “Real-world CO2 impacts of traffic congestion”. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2058 (2008), S. 163–171.
- [78] C. F. Minett, A. M. Salomons, W. Daamen, B. Van Arem und S. Kuijpers. “Eco-routing: Comparing the fuel consumption of different routes between an origin and destination using field test speed profiles and synthetic speed profiles”. In: *2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems, Proceedings, FISTS 2011* (2011), S. 32–39. DOI: 10.1109/FISTS.2011.5973621.
- [79] M. Barth und K. Boriboonsomsin. “Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system”. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 14.6 (2009), S. 400–410.
- [80] O. Servin, K. Boriboonsomsin und M. Barth. “An Energy and Emissions Impact Evaluation of Intelligent Speed Adaptation”. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC* (2006), S. 1257–1262. DOI: 10.1109/ITSC.2006.1707395.
- [81] M. Li, K. Boriboonsomsin, G. Wu, W.-B. Zhang und M. Barth. “Traffic Energy and Emission Reductions at Signalized Intersections : A Study of the Benefits of Advanced Driver Information”. In: *International Journal of ITS Research* 7.1 (2009), S. 49–58.
- [82] H. Rakha und R. K. Kamalanathsharma. “Eco-driving at signalized intersections using V2I communication”. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*. 2011, S. 341–346. ISBN: 9781457721984. DOI: 10.1109/ITSC.2011.6083084.
- [83] K. Boriboonsomsin, M. Barth, W. Zhu und A. Vu. “ECO-Routing Navigation System based on Multi- Source Historical and Real-Time Traffic Information”. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 13.4 (2012), S. 1694–1704.

- [84] H. Zhai, H. C. Frey und N. M. Rouphail. “A vehicle-specific power approach to speed- and facility-specific emissions estimates for diesel transit buses”. In: *Environmental science & technology* 42.21 (2008), S. 7985–7991.
- [85] M. C. Coelho, H. C. Frey, N. M. Rouphail, H. Zhai und L. Pelkmans. “Assessing methods for comparing emissions from gasoline and diesel light-duty vehicles based on microscale measurements”. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 14.2 (2009), S. 91–99.
- [86] P. Hemmerle, M. Koller, H. Rehborn, G. Hermanns, B. S. Kerner und M. Schreckenberg. “Increased consumption in oversaturated city traffic based on empirical vehicle data”. In: *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2014: Smart Systems for Safe, Clean and Automated Vehicles*. Hrsg. von J. Fischer-Wolfahrt und G. Meyer. Springer International Publishing, 2014, S. 71–79.
- [87] P. Hemmerle, H. Rehborn, G. Hermanns, B. S. Kerner, M. Schreckenberg und M. Koller. “Classification of Empirical Urban Traffic Patterns”. In: *10th ITS European Congress, Helsinki, Proceedings*. 2014.
- [88] *Next Generation Simulation (NGSIM)*. U.S. Department of Transportation. URL: <http://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/ngsim.htm> (besucht am 10.02.2016).
- [89] *UR:BAN - Urbaner Raum: Benutzergerichte Assistenzsysteme und Netzmanagement*. URL: <http://urban-online.org/de/urban.html> (besucht am 10.02.2016).
- [90] H. Rehborn, M. Schreckenberg, B. S. Kerner, G. Hermanns, P. Hemmerle, I. N. Kulkov, O. Kannenberg, S. Lorkowski, N. Witte, H. Böhme, T. Finke und P. Maier. “Eine methodische Einführung zur antriebsartabhängigen Routensuche in einem Ballungsraum”. In: *Straßenverkehrstechnik* 48.3 (2014), S. 151–157.
- [91] H. Rehborn, P. Hemmerle, M. Koller, M. Schreckenberg, B. S. Kerner, G. Hermanns, I. N. Kulkov, O. Kannenberg, S. Lorkowski, N. Witte, H. Böhme, T. Finke, P. Maier und F. Offermann. *The Influence Of Urban Traffic Congestion On Resource Consumption In Vehicles*. 23. Aachener Kolloquium, 2014.
- [92] P. Hemmerle, G. Hermanns, B. S. Kerner, M. Koller, H. Rehborn und M. Schreckenberg. *Verfahren und System zur verbrauchsoptimalen Routenberechnung für ein Fahrzeug*. Deutsches Patent und Markenamt: DE 10 2015 003 766 A1, 2015.
- [93] P. Hemmerle, M. Koller, H. Rehborn und F. Starman. *Verfahren zur Längsregelung eines Fahrzeugs*. Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2015 000 506 A1, 2015.

Veröffentlichungen

Im Zusammenhang mit dieser Dissertation sind die folgenden Veröffentlichungen entstanden (Nummerierung gemäß Literaturverzeichnis).

- [46] G. Hermanns, P. Hemmerle, H. Rehborn, M. Koller, B. S. Kerner und M. Schreckenberg. “Microscopic Simulation of Synchronized Flow in Oversaturated City Traffic: Effect of Driver’s Speed Adaptation”. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2490 (2015), S. 47–55.
- [47] B. S. Kerner, P. Hemmerle, M. Koller, G. Hermanns, S. L. Klenov, H. Rehborn und M. Schreckenberg. “Empirical synchronized flow in oversaturated city traffic”. In: *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 90.3 (2014), S. 032810. DOI: 10.1103/PhysRevE.00.002800.
- [64] P. Hemmerle, M. Koller, G. Hermanns, M. Schreckenberg, H. Rehborn und B. S. Kerner. “Impact of Synchronised Flow in Oversaturated City Traffic on Energy Efficiency of Conventional and Electrical Vehicles”. In: *Traffic and Granular Flow 2015 (angenommen)*. 2016.
- [65] P. Hemmerle, G. Hermanns, M. Koller, H. Rehborn, B. S. Kerner und M. Schreckenberg. “Macroscopic Consumption Matrix for On-Line Energy-efficient Route Guidance”. In: *Transportation Research Board 2015 Annual Meeting, Proceedings*. Washington D.C., 2015.
- [66] P. Hemmerle, M. Koller, H. Rehborn, B. S. Kerner und M. Schreckenberg. “Fuel consumption in empirical synchronised flow in urban traffic”. In: *IET Intelligent Transport Systems* (2015). DOI: 10.1049/iet-its.2015.0014.
- [67] P. Hemmerle, G. Hermanns, M. Koller, H. Rehborn, B. S. Kerner und M. Schreckenberg. “Effect of Synchronized Flow on On-line Energy-efficient Route Guidance in an Urban Road Network”. In: *Mobil.TUM 2015 - International Scientific Conference on Mobility and Transport Technologies, Solutions and Perspectives for Intelligent Transport Systems, Proceedings*. München, 2015.
- [86] P. Hemmerle, M. Koller, H. Rehborn, G. Hermanns, B. S. Kerner und M. Schreckenberg. “Increased consumption in oversaturated city traffic based on empirical vehicle data”. In: *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2014: Smart Systems for Safe, Clean and Automated Vehicles*. Hrsg. von J. Fischer-Wolfahrt und G. Meyer. Springer International Publishing, 2014, S. 71–79.
- [87] P. Hemmerle, H. Rehborn, G. Hermanns, B. S. Kerner, M. Schreckenberg und M. Koller. “Classification of Empirical Urban Traffic Patterns”. In: *10th ITS European Congress, Helsinki, Proceedings*. 2014.
- [92] P. Hemmerle, G. Hermanns, B. S. Kerner, M. Koller, H. Rehborn und M. Schreckenberg. *Verfahren und System zur verbrauchsoptimalen Routenberechnung für ein Fahrzeug*. Deutsches Patent und Markenamt: DE 10 2015 003 766 A1, 2015.